

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Izvor Grubišić

Nikola Mateša

Zagreb, 2010.

IZJAVA

Izjavljujem da sam diplomski rad izradio potpuno samostalno, koristeći se literaturom i znanjem stečenim tijekom studija na fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, i na temelju vlastitih istraživanja i proučavanja literature uz nadzor mentora prf. Dr. Izvora Grubišića.

Nikola Mateša

U Zagrebu 1. srpnja 2010.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Izvor Grubišić

Nikola Mateša

Zagreb, 2010.

IZJAVA

Izjavljujem da sam diplomski rad izradio potpuno samostalno, koristeći se literaturom i znanjem stečenim tijekom studija na fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, i na temelju vlastitih istraživanja i proučavanja literature uz nadzor mentora prf. Dr. Izvora Grubišića.

Nikola Mateša

U Zagrebu 1. srpnja 2010.

SAŽETAK

U radu je prikazana konstrukcija nadgrađa od kompozitnih materijal kao alternativa aluminijskom nadgrađu. Na početku rada opisani su materijali za izradu polimernih kompozita, njihova mehanička i konstruktivna svojstva, te primjena. Također su uspoređeni sa ostalim konstrukcijskim materijalima u brodogradnji kako bismo vidjeli prednosti njihove primjene. Konstrukcija je rađena na osnovi dva konstrukcijska materijala: stakloplastika, sendvič paneli sa PVC pjenom kao jezgrom i stakloplastičnim laminatom kao površinskim slojem.

Analizirana je mogućnost primjene balističke zaštite nadgrađa i to sa S2-staklenim vlaknima te izračunate mase za pojedine stupnjeve zaštite. Predložen je i način spoja sendvič konstrukcije sa metalnim trupom broda. Za projekt konstrukcije korištena su pravila LR Secial Service Craft i računalni program LR SSC v.5.0.4. Dobiveni rezultati su uspoređeni sa postojećim projektom patrolnog broda Bakar.

SADRŽAJ

1.	Uvod	1
1.1	Općenito o patrolnom brodu	1
2.1	Patrolni brod Bakar	2
2.	Kompozitni materijali	4
2.1	Vlakna	6
2.2.1	Staklena vlakna	9
2.1.2	Ugljična vlakna	10
2.1.3	Aramidna vlakna	12
2.1.4	Hibridna vlakna.....	13
2.1.5	Keramička vlakna	13
2.1.6	Usporedba najvažnijih svojstava vlakana	14
2.2	Matrica	15
2.2.1	Polimerne matrice	16
2.3	Usporedba vlaknima ojačanih kompozita sa ostalim konstrukcijskim materijalima	20
3.	Računalni program Lloyds register SSC v5.0.4	24
4.	Konstrukcija nadgrađa od stakloplastike	28
4.1	Korišteni materijali.....	28
4.2	Proračun konstrukcije od stakloplastike.....	32
5.	Konstrukcija trupa od naprednog kompozita.....	38
5.1	Materijali i vrsta konstrukcije	38
5.1	Proračun konstrukcije od sendvič kompozita.....	41
6.	Masa i centracija	45
6.1	Masa i centracija stakloplastičnog nadgrađa	45
6.2	Masa i centracija nadgrađa od Sendvič konstrukcije	48
7.	Protubalistička zaštita	51

8.	Spoj kompozitnog nadgrađa sa metalnim trupom	56
9.	Usporedba dobivenih rezultata sa projektom patrolnog broda Bakar	59
10.	Zaključak.....	61
12.	Literatura.....	62

POPIS SLIKA

Slika 1.1 Patrolni brod sa kompozitnom protubalističkom zaštitom	1
Slika 1.2 Opći plan - Bakar	3
Slika 2.1 [2] usporedba osnovnih tipova kompozita: kompoziti sa česticama, kompoziti sa vlaknima, slojeviti kompoziti	4
Slika 2.1 [3] Aramidna vlakna	12
. Slika 3.1 Prikaz opterećenja na trup broda – LR SSC	24
. Slika 3.2 Prikaz izbornika za unos osnovnih podataka o plovilu	25
. Slika 3.3 Prikaz izbornika za definiranje ukrepe	26
Slika 3.4 Prikaz tablice usporedbe stvarnih i dozvoljenih naprezanja	27
Slika 4.1 Stakleni mat (pust)	29
Slika 4.2 [3] Različite vrste tkanja rovinga	29
Slika 4.3 Roving	30
Slika 4.4 3-D model nadgrađa – pogled sprijeda	32
Slika 4.5 3-D model nadgrađa – pogled sa krme	33
Slika 4.6 3-D model polovice strukture boka	34
Slika 4.7 3-D model strukture palube	35
Slika 4.8 3-D model strukture krova nadgrađa	35
Slika 4.9 3-D model strukture krova nadgrađa	36
Slika 4.10 3-D model strukture stražnjeg dijela nadgrađa sa prednjom pregradom	37
Slika 5.1 [13] Shematski prikaz sačaste sendvič konstrukcije	39
Slika 5.2 Divinycell H100 – jezgra	40
Slika 5.3 Struktura profila sa debljinama	41
Slika 5.4 Struktura Sendviča sa debljinama i mehaničkim karakteristikama pojedinog sloja	42
Slika 5.5 3-D model konstrukcije nadgrađa od sendvič konstrukcije	44
Slika 6.1 Tablica sa svojstvima laminata izračunata računalnim programom LR SSC	45
Slika 6.2 3-D model nadgrađa od stakloplastike za proračun masa i centraciju	46
Slika 6.3 Tablica sa svojstvima sendvič laminata (LR SSC)	48
Slika 6.4 Tablica sa svojstvima Okvira (LR SSC)	48
Slika 6.5 3-D model nadgrađa za proračun mase i centracije	49

Slika 7.1 [10] Usporedba veličine streljiva sa AA baterijom.....	52
Slika 7.2 [12] Rezultati V50 testa s obzirom na gustoću za različite vrste kompozita	53
Slika 7.3 [12] Rezultati V50 testa s obzirom na debljinu kompozita za različite vrste kompozita	53
Slika 8.1 [14] Različite vrste spojeva za sendvič strukture	57

POPIS TABLICA

Tablica 2.1 [3] Svojstva keramičkih vlakana	13
Tablica 2.2 [3] Usporedba najvažnijih mehaničkih svojstava između vlakana	14
Tablica 2.3 [3] Mehanička svojstva materijala matrice.....	15
Tablica 4.1 Konstrukcijski pritisci na pojedine dijelove strukture.....	33
Tablica 5.1 [5] Gustoća i čvrstoća jezgri od polimernih pjena	38
Tablica 5.2 Struktura nadgrađa	43
Tablica 6.1 Masa i centracija nadgrađa od stakloplastike.....	47
Tablica 6.2 Masa i centracija nadgrađa od Sendvič panela	50
Tablica 7.1 Masa nadgrađa za pojedine stupnjeve zaštite	55
Tablica 9.1 Masa nadgrađa za pojedine stupnjeve zaštite	59

POPIS DIJAGRAMA

Dijagram 2.1 [3] zastupljenost pojedine vrste vlakana u brodograđevnoj industriji.....	8
Dijagram 2.2 odnosi naprezanja i deformacija različitih vrsta vlakana.....	14
Dijagram 2.3 [3] Vlačna čvrstoća i modul elastičnosti različitih vrsta smola	17
Dijagram 2.4 [3] Naprezanje-deformacija do loma različitih vrsta smola	17
Dijagram 2.5 [5] Upotreba različitih vrsta smola u proizvodnji brodograđevnih dijelova.	19
Dijagram 2.6 [3] vlačna čvrstoća različitih vrsta konstrukcijskih materijala	20
Dijagram 2.7 [3] vlačni modul različitih vrsta konstrukcijskih materijala	21
Dijagram 2.8 [3] specifična gustoća različitih vrsta konstrukcijskih materijala	22
Dijagram 2.9 [3] specifična vlačna čvrstoća različitih vrsta konstrukcijskih materijala	23
Dijagram 2.10 [3] specifična vlačni modul različitih vrsta konstrukcijskih materijala	23

1. Uvod

1.1 Općenito o patrolnom brodu

Zadaća patrolnih plovila je zaštita nacionalnih voda, ne samo u blizini obale već i zaštićenih gospodarskih područja. Tako široki spektar zadaća uvjetuje i raspon istisnina od 3000 (za velike oceanske patrolne brodove) do samo 30 tona za male priobalne čamce. Zajedničko im je da su projektirani kako bi onemogućili ilegalni ulazak uštićeno područje i djelovanje unutar njih, bez obzira na to radi li se o krijumčarenju, piratstvu ili ribolovu. Dok je borba protiv ilegalnog ribolova uglavnom slična policijskim dužnostima, borba protiv krijumčara i pirata često više nalikuje borbenom djelovanju.

Mogu biti u sustavu Ratne mornarice, obalne straže ili policije te se mogu koristiti u službi spašavanja. Morski patrolni brodovi su oko 30 m dužine te su obično opremljeni jednim topom srednjega kalibra kao glavno oružje te lakšim sekundarnim naoružanjem kao što su strojnice i oružje za blisku borbu. Ovisno o ulozi, plovila u ovoj klasi mogu biti opremljeni sofisticiranim senzorima te sistemom za kontrolu paljbe koji im omogućuje da nose torpeda, protu brodске i protuzračne rakete.

Njegova mala veličina i relativno mala cijena čini ga jednim od najčešćih tipova ratnog broda u svijetu.



Slika 1.1 Patrolni brod sa kompozitnom protubalističkom zaštitom

2.1 Patrolni brod Bakar

Bakar je patrolni brod tvrtke Adria-Mar brodogradnja d.o.o. Glavni zadaci su nadziranje i zaštita teritorijalnih voda i ekskluzivnih ekonomskih zona (EEZ), nadzor brodovlja i plovidbe, misije traženja i spašavanja na moru, nadzor i kontrola onečišćenja, transport oružanih snaga i opreme, lakše borbene zadaće.

Glavne karakteristike i značajke:

$$L_{oa} = 31,55 \text{ m} \quad L_{wl} = 28,25 \text{ m}$$

$$B = 6,49 \text{ m} \quad T = 1,60 \text{ m}$$

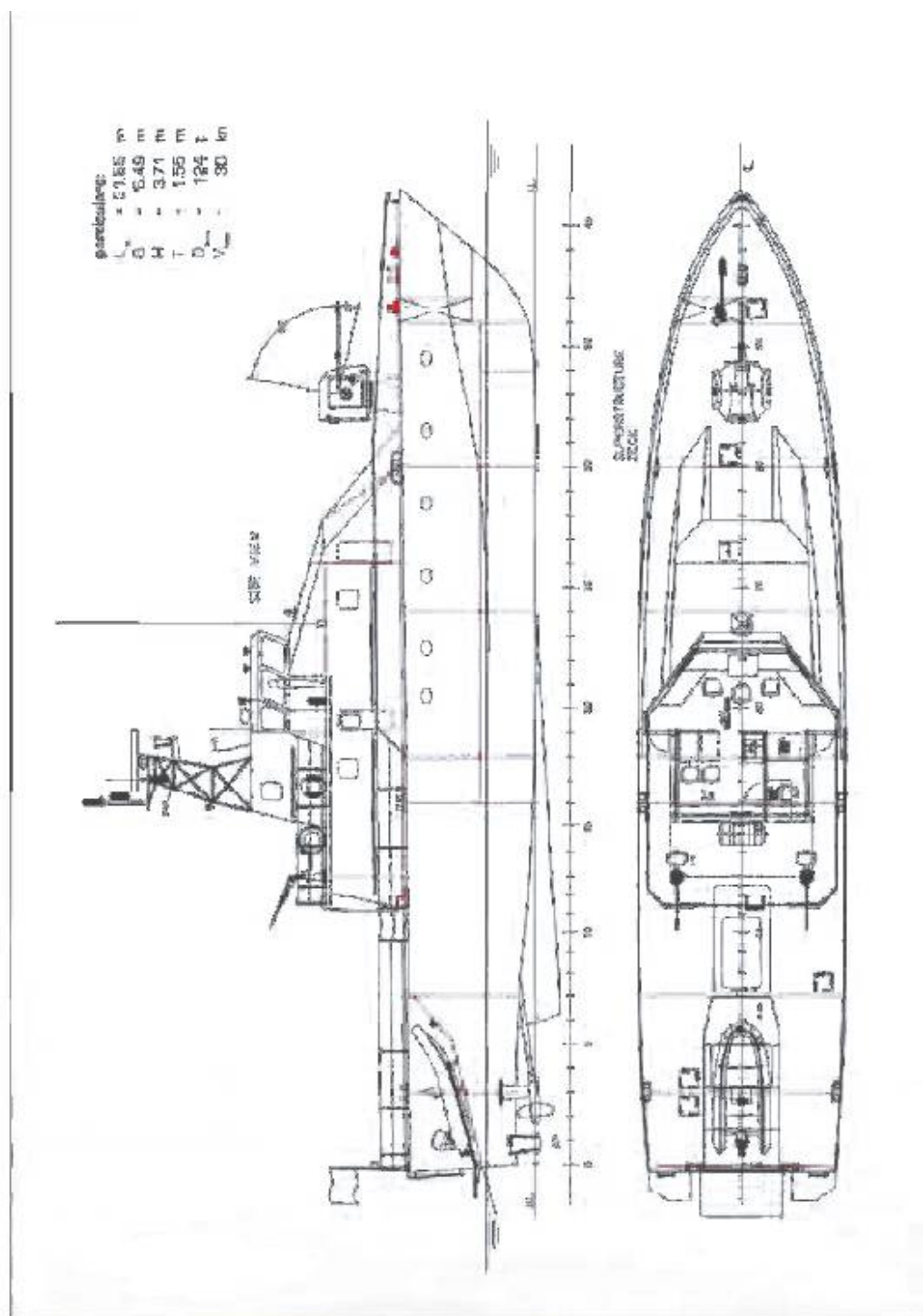
$$H = 4,06 \text{ m}$$

$$D_{max} = 124 \text{ t} \quad P = 3480 \text{ kW}$$

$$v_{max} = 30 \text{ čv} \quad v_k = 15 \text{ čv}$$

Posada je 12 članova + 4 gosta, doplov mu je 1000 nm pri brzini od 15 čv, autonomija do 10 dana, a puna operabilnost mu je do stanja mora 4. Naoružan je jednim Kongsberg Sea Protector 12.7 mm sa žirostabilizacijom i upravljanjem paljbom te dvije strojnice 12.7 mm.

U originalnoj izvedbi trup mu je građen od čelika po pravilima Lloyds registra (SSC), dok mu je nadgrađe od aluminija. Pogonjen je sa dva četverotaktna MTU 12V 396 TE94 motora ukupne snage 3480 kW.



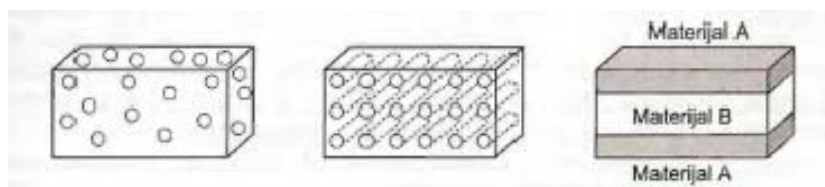
Slika 1.2 Opći plan - Bakar

2. Kompozitni materijali

Kompozitni materijali sastoje se od dva osnovna konstituenta: vlakna i matrice koji čine slojeve koji su međusobno povezani i tako čine višeslojni kompozit (laminat). Vlakna su nosivi element kompozita i daju mu čvrstoću, dok matrica drži vlakna zajedno, ima važnu funkciju prijenosa opterećenja na vlakno, daje vanjsku formu kompozita, definira njegovo ponašanje obzirom na djelovanje atmosferskih uvjeta itd.[1]. Najčešće upotrebljavani kompozitni materijali mogu se podijeliti u tri glavne grupe:

- **Kompoziti sa polimernom matricom (FRP-Fiber Reinforced Plastics)** – to je najzastupljeniji tip kompozita u kojima se koristi matrica na bazi polimera, a ojačani su različitim vrstama vlakana kao što su staklo, ugljik i armaid.
- **Kompoziti sa metalnom matricom (MMC-Metal Matrix Composites)** – ovdje se kao matrica koriste metalni materijali, kao što je aluminij, te ojačala kao što je silicij karbida. Koristi se u automobilske industriji.
- **Kompoziti sa keramičkom matricom (CMC-Ceramic Matrix Composites)** – ovdje se kao matrica koriste keramički materijali dok se kao ojačala koriste kratka vlakna napravljena od silicij karbida i bor nitrida. koriste se u okolini gdje se javlja visoka temperatura.

Također mogu se razvrstati kao : kompoziti sa česticama, vlaknima ojačani kompoziti , slojeviti kompoziti i sendvič konstrukcije. Na slici 2.1 [2] prikazana je usporedba takve podjele kompozita.



Slika 2.1 [2] usporedba osnovnih tipova kompozita: kompoziti sa česticama, kompoziti sa vlaknima, slojeviti kompoziti

Ukupno ponašanje kompozita će ovisiti o:

1. Svojstvima matrice i ojačala,
2. Veličini i raspodjeli konstituenta
3. Volumnom udjelu konstituenta
4. Obliku konstituenta
5. Prirodi i jakosti veze među konstituentima

Za ovaj diplomski rad tematski su isključivo relevantni vlaknima ojačani polimeri (kompoziti) koji zbog svojih svojstava su zanimljivi kod primjene u brodograđevnoj industriji. Materijali matrice kao što su epoksidne i poliesterske smole imaju ograničenu upotrebu pri izradi struktura pošto njihova mehanička svojstva nisu visoka u usporedbi sa većinom metala. No naravno imaju neka odlična svojstva kao što je mogućnost oblikovanja u složene oblike.

Materijali kao što su staklo, aramid ili bor imaju visoki modul elastičnosti i vlačnu čvrstoću ali u “čvrstoj formi” ta svojstva nisu izražena. To je zbog činjenice da kada je materijal opterećen, od slučajnih mikroskopskih površinskih pukotina će se na materijalu stvoriti veće pukotine i doći će do loma materijala i to ispod njegove točke loma. Materijal se izrađuje u obliku vlakana te se kombinirajući sa matricom mogu dobiti željena svojstva kompozita.

Glavne karakteristike kompozita su:

- mala gustoća
- visoka čvrstoća
- visoka krutost
- visoka žilavost
- samogasiva i antikorozivna svojstva
- postojanost prema većini kiselina i lužina
- visoka otpornost na koroziju
- velika mogućnost prigušenja vibracija
- odlična otpornost na zamor (u usporedbi sa većinom metala)

2.1 Vlakna

Mehanička svojstva kompozita kao što su čvrstoća i krutost ovise vlaknima. Osnovni zadatci vlakana su da prihvati opterećenje (kod konstrukcijskih kompozita vlakna nose 70-90% opterećenja), da osiguraju čvrstoću krutost i toplinsku stabilnost te da osiguraju električnu vodljivost ili izolaciju ovisno o namjeni kompozita. Vlakna trebaju biti čvrsta, kruta i lagana, a također trebaju imati visoko talište.

Vlakna moraju biti čvrsta, kruta i lagana, a također moraju imati visoko talište. Specifična čvrstoća i specifični modul elastičnosti materijala definirani su izrazima:

$$\text{Specifična čvrstoća} = R_m(R_e)/\rho,$$

$$\text{Specifični modul elastičnosti} = E/\rho,$$

gdje su: E – modul elastičnosti
 R_m – vlačna čvrstoća,
 R_e – granica razvlačenja,
 ρ – gustoća.

Kao materijali za vlakna preferiraju se materijali visokog specifičnog modula elastičnosti ili specifične čvrstoće.

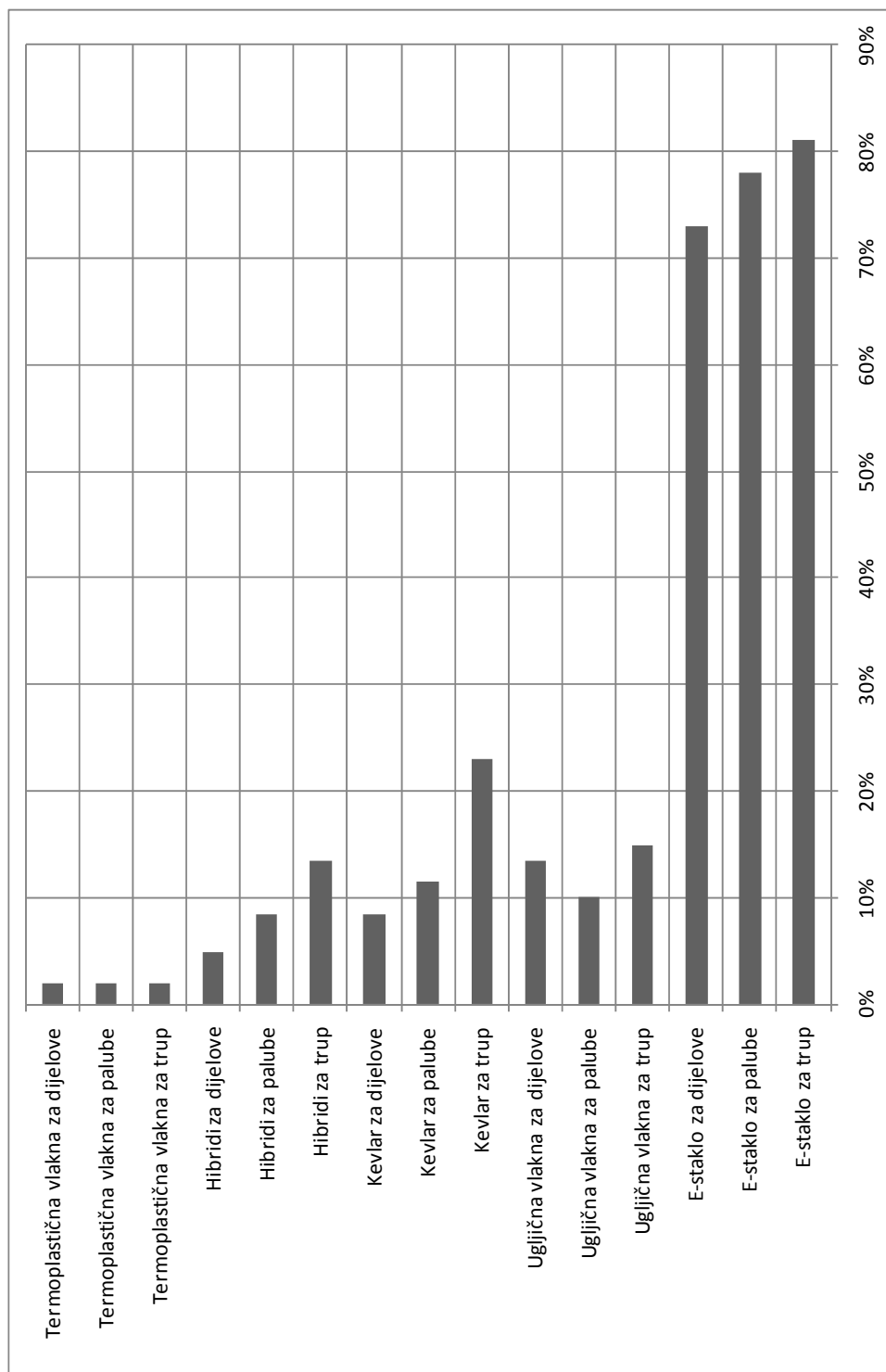
U uporabi su vrlo raznoliki materijali ojačala da bi se dobila željena svojstva kompozita. Na osnovi staklenih vlakana ugrađenih u polimernu matricu dobiva se kompozit pogodan za primjenu u brodogradnji i zrakoplovstvu. Vlakna od bora, ugljika i polimera osiguravaju izrazito ojačavanje. U tablici 2.1 mogu se vidjeti mehanička svojstva materijala vlakna.

Tablica 2.1 [1] Osnovna mehanička svojstva ojačala (vlakana)

Vrsta Vlakna	Gustoća [kg/m ³]	Modul elastičnosti [Gpa]	Vlačna čvrstoća [Gpa]	Specifični modul	Specifična čvrstoća
Poliester	1,38	11	1	8	0,72
E-staklo	2,54	72	3,4	2,8	1,34
S-staklo	2,49	86	4	34	1,57
Kevlar 49	1,45	130	3,6	90	2,48
Kevlar 29	1,44	69	2,9	49	2,02
Ugljična vlakna visoke čvrstoće (HS)	1,74	277	3,1	30	1,77
Ugljična vlakna visokog modula (HM)	1,81	390	2,1	215	1,16

Danas se najviše koriste ugljična i staklena vlakna. Zastupljenost pojedinih vlakana s obzirom na konstrukcijske dijelove broda je prikazan na dijagramu 2.1 [2]. Staklenim vlaknima ojačani kompoziti su količinski najzastupljenija ojačala, a upotrebljavaju se u gradnji svih vrsta tipova čamaca i malih brodova, dijelova nadgrađa, cijelih nadgrađa kod većih brodova, opreme i uređaja kao što su vrata, okviri brodskih prozora, pokrovi grotala, tankovi, spremnici, itd. Ovako rasprostranjenoj primjeni ovaj materijal treba zahvaliti vrlo dobrim fizičko-mehaničkim svojstvima kao što su:

1. Visoki omjer čvrstoća/težina – čvrste i lake konstrukcije
2. Mogućnost izrade velikih i složenih oblika iz jednoga dijela
3. Mogućnost gradnje i primjene na licu mjesta i zbog toga ekonomičnija gradnja
4. Variranje debljine po potrebi kod kompliciranih oblika
5. Otpornost na koroziju
6. Lako održavanje i jednostavni popravci
7. Nemagnetičnost i elektroizolaciona svojstva
8. Promjena mehaničkih svojstava unutar vrlo širokih granica
9. Kod gotovih proizvoda nema krivljenja, stezanja ili pucanja
10. Ima nisku toplinsku vodljivost

Dijagram 2.1 [3] zastupljenost pojedine vrste vlakana u brodograđevnoj industriji

2.2.1 Staklena vlakna

Najviše upotrebljavana ojačala za kompozite. Glavne prednosti upotrebe staklenih ojačanja u kompozitima jesu: visoka čvrstoća, mala težina, dimenzijska stabilnost, postojanost na povišenu temperaturu i koroziju, dobra električna svojstva te relativno jednostavna proizvodnja te stoga i niska cijena (u odnosu na druge vrste ojačala).

Staklena vlakna dobivaju se raznim tehnološkim postupcima iz staklene taline. Staklena vlakna razlikuju se po kemijskom sastavu i svojstvima koje označuju slova:

- **E** – niska električna provodljivost
- **C** – kemijska postojanost
- **S** – visoka čvrstoća
- **M** – visoki modul rastezljivosti
- **A** – alkalijsko staklo

Tablica 2.3 [4] Osnovna mehanička svojstva pojedinih vrsta staklenih vlakana

Tip staklenog vlakna				
Svojstvo	E	C	S	A
Gustoća [g/cm^3]	2,54-2,55	2,49	2,48-2,49	2,5
Lomnost	1,547	1,541	1,523	1,512
Modul rastezljivosti	72-74	70	84-88	72,5
Rastezna čvrstoća [N/mm^2]	3,5	2,7-3,1	4,6	2,414
Toplinska rastezljivost [$10^{-7}/^\circ\text{C}$]	49-60	70-72	29-50	90

Tablica 2.4 [4] Osnovna mehanička svojstva pojedinih vrsta staklenih vlakana

Vrsta spoja	E-Staklo	S-staklo
Silicij dioksid	52-56%	64-66%
Kalcij Oksid	16-25%	0-0,3%
Aluminij Oksid	12-16%	24-26%
Bor Oksid	5-10%	-
Natrij i Kalij Oksid	0-2%	0-0,3%
Magnezij Oksid	0-5%	9-11%
Željezo Oksid	0,05-0,4%	0-0,3%
Titan Oksid	0-0,8%	-
Fluor	0-1%	-

U brodogradnji se najviše koristi E-staklo, te S-staklo koje ima 25% bolju tlačnu čvrstoću, 40% veću vlačnu čvrstoću, 20% veći modul elastičnosti te 4% manju gustoću ali zato mu je cijena 2 – 4 puta viša što ograničava njegovu upotrebu.

2.1.2 Ugljična vlakna

Ugljična vlakna imaju od poznatih vlakana najvišu specifičnu krutost, vrlo visoku vlačnu i tlačnu čvrstoću te vrlo visoku otpornost prema koroziji, puzanju i zamoru materijala. Njihova žilavost je međutim niža od bilo staklenih ili aramidnih vlakana. Ugljična (karbonska) vlakna se proizvode kontroliranom oksidacijom i karbonizacijom ugljikom bogatih organskih predkursora koji su već u obliku vlakana. Najčešći predkursor je poliakrilonitril zato jer daje najbolja svojstva ugljičnih vlakana, ali vlakna također mogu izrađena i od fenolnih smola ili celuloze. Glavni nedostatak im je visoka cijena koja je funkcija visoke cijene proizvodnje predkursora (potrošene energije u proizvodnji). Različitim postupcima karbonizacije dobivamo različita mehanička svojstva vlakana.

Ugljična vlakna, s obzirom na njihove mehaničke karakteristike možemo klasificirati kao HS (High Strength – visoke čvrstoće), IM (Intermediate Modulus – umjerenog modula elastičnosti), HM (High Modulus – visokog modula elastičnosti) i UHM (Ultra High Modulus – vrlo visokog modula elastičnosti). U tablici 2.4 [3] mogu se vidjeti mehanička svojstva različitih vrsta ugljičnih vlakana.

Tablica 2.5 [3] Svojstva različitih vrsta ugljičnih vlakana

Razred	Vlačni Modul [Gpa]	Vlačna čvrstoća [Gpa]
Ugljična vlakna HS (<265GPa)	T300	230
	T700	235
	HTA	238
	UTS	240
	34-700	234
	AS4	241
	T650-35	241
	Panex 33	228
	F3C	228
	TR50S	235
	TR30S	234
Ugljična vlakna IM (265-320 Gpa)	T800	294
	M30S	294
	IMS	295
	MR40/MR50	289
	IM6/IM7	303
	IM9	310
	T650-42	290
	T40	290
Ugljična vlakna HM (320-440 Gpa)	M40	392
	M40J	377
	HMA	358
	UMS2526	395
	MS40	340
	HR40	381
Ugljična vlakna UHM (≈440 Gpa)	M46J	436
	UMS3536	435
	HS40	441
	UHMS	441

2.1.3 Aramidna vlakna

Aramidna vlakna počinju sa svojom upotrebom ranih sedamdesetih godina prošlog stoljeća kao zamjena čeličnim žicama u automobilskim gumama. Naziv ARAMID dolazi od naziva ARomatic polyAMID (Aromatski poliamid). To je organski polimer koji se proizvodi predenjem čvrstih vlakana iz tekućeg stanja polimera. Izvrsne karakteristike aramidnih vlakana su mala težina, visoka vlačna čvrstoća i visoki modul, otpornost na udar i zamor materijala te mogućnost jednostavnog tkanja. Tlačna naprezanja aramida nisu tako dobro izražena kao kod staklenih vlakana jer prikazuju nelinearno duktilno ponašanje na nižim vrijednostima naprezanja.



Slika 2.1 [3] Aramidna vlakna

Sadržavaju visoka mehanička svojstva pri temperaturama od -200°C do $+200^{\circ}\text{C}$. Podložna su djelovanju jakih kiselina ali su postojana na otapala i druge kemikalije.

Aramidna vlakna u suvremenim mješavinama već nadomještaju čelik i aluminij. Jedna su od osnovnih komponenata za izradu polimernih materijala gdje se traže izuzetna toplinska i mehanička svojstva. Upotrebljavaju se u izradi zračnih i svemirskih letjelica, vojnoj industriji, brodogradnji, građevinarstvu itd. [4].

2.1.4 Hibridna vlakna

Hibridna vlakna se rade od dvije ili više vrsti vlakana kako bi se postigla željena svojstva. Najčešće korištena hibridna vlakna u brodogradnji i zrakoplovstvu su ugljično-staklena vlakna. [4]

Hibridizacija se izvodi najčešće izravno u proizvodnji kompozitnog proizvoda, što znači kombinaciju različitih vlakana u cilju postizanja željenih svojstava proizvoda. Ovaj tip hibridnih vlakana upotrebljava se kako bi se promijenila sljedeća svojstva:

- poboljšanje udarne žilavosti
- sprečavanje galvanske korozije
- niža cijena

2.1.5 Keramička vlakna

Keramička vlakna su anorganskog podrijetla i dolaze u različitim oblicima. Zanimljiva su zbog visoke toplinske postojanosti i postojanosti na djelovanje vlage, te su općenito primjereni za upotrebu u kompozitima koji su podvrgnuti ekstremnim opterećenjima. Sva keramička vlakna se najviše upotrebljavaju s epoksidnim smolama, za proizvode industrijske opreme koja je podvrgnuta teškim uvjetima. U sljedećoj tablici mogu se vidjeti najznačajnija mehanička svojstva različitih tipova keramičkih vlakana.

Tablica 2.1 [3] Svojstva keramičkih vlakana

Materijal	Rastezna čvrstoća [N/mm ²]	Modul rastezljivosti [10 ³ Nmm ²]	Gustoća [g/cm ³]
RFC	1725	83-103	2,7
Al oksid	1380	380	3,9
Bor	3520	400	2,45
S i C monofilament	3450-4500	430	3
S i C ljuške	7000	690	
S i C vlakna	2480-3200	180-210	2,56

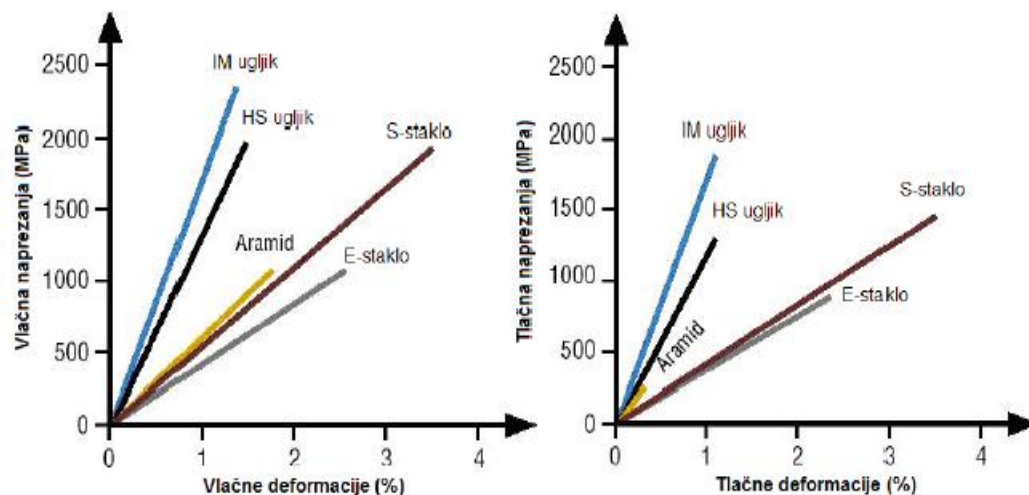
2.1.6 Usporedba najvažnijih svojstava vlakana

Uspoređujući različite vrste vlakana jedne sa drugima možemo utvrditi da imaju različite prednosti i nedostatke. Te prednosti odnosno nedostaci čine različite tipove vlakana više ili manje pogodne za različitu upotrebu. U tablici 2.6 može se vidjeti usporedba najznačajnijih karakteristika vlakana gdje A predstavlja odlično svojstvo, B osrednje, dok C označava loše svojstvo.

Tablica 2.2 [3] Usporedba najvažnijih mehaničkih svojstava između vlakana

SVOJSTVO	Aramidna vlakna	Ugljična vlakna	Staklena vlakna
Visoka vlačna čvrstoća	B	A	B
Visoki vlačni modul	B	A	C
Visoka tlačna čvrstoća	C	A	B
Visoki tlačni modul	B	A	C
Visoka savojna čvrstoća	C	A	B
Visoki savojni modul	B	A	C
Visoka udarna čvrstoća	A	C	B
Visoka smična čvrstoća između laminata	B	A	A
Visoka smična čvrstoća u laminatu	B	A	A
Niska gustoća	A	B	C
Visoka otpornost prema zamoru materijala	B	A	C
Visoka otpornost na požar	A	C	A
Visoka termalna zaštita	A	C	B
Visoka električna zaštita	B	C	A
Niski koeficijent toplinskog širenja	A	A	A
Niska cijena	C	C	A

Dijagram 2.2 odnosi naprezanja i deformacija različitih vrsta vlakana



2.2 Matrica

Osnovna funkcija matrice:

- Prenosanje opterećenja na vlakno
- Odvajanje vlakana jednih od drugih u svrhu sprečavanja širenja pukotina u materijalu
- Formiranje vanjskog oblika kompozitne konstrukcije
- Zaštita kompozita od utjecaja okoline

Matrice mogu biti polimerne (duromeri i plastomeri), ugljične, metalne, keramičke i druge. Materijal matrice u pravilu mora ispuniti više funkcija, od kojih su neke ključne za postizanje zadovoljavajućih performansi kompozita. Matrica ne smije kemijski reagirati sa vlaknom i mora dobro prijanjati uz vlakna. [6]

Tablica 2.3 [3] Mehanička svojstva materijala matrice

Tip matrice	gustoća [kg/m ³]	Modul elastičnosti [Gpa]	Vlačna čvrstoća [Mpa]	Produljenje [%]
Poliester	1500	4,5	90	5
Vinil ester	1150	4	90	5
Epoksi	1400	6	130	8,5
Bizmaelimid	1320	3,6	78	6,6
Poliimid	1890	4,9	120	3
Polieter imid	1270	3	105	60
Poliamid imid	1400	5	95-185	12-18
PPS	1340	3,3	70-75	3
PEEK	1320	-	92-100	150
Polisulfon (PS)	1240	2,5	70-75	50-100
Polipropilen (PP)	900	1-1,4	25-38	300
Polikarbonat (PC)	1200	2,4	45-70	50-100
Aluminij	2700	70	200	-
Ti-6Al-4V	4500	110	1000	-
Borosilikatno staklo	2300	60	100	-
MgO	3600	210-300	97-130	-
Al ₂ O ₃	4000	360-400	250-300	-
SiC	3200	400-440	310	-

Svojstva matrice izrazito su važna za određivanje uzdužne tlačne čvrstoće, poprečne vlačne čvrstoće kao i međuslojne posmične čvrstoće te se obično kaže da su ova svojstva uvjetovana matricom. Svojstva matrice najčešće određuju i svojstva kompozita, kao i ograničenja u primjeni. U slučaju izloženosti kompozita kemijskim utjecajima ili utjecajima okoline, matrica je ta koja je prva izložena smanjenju mehaničkih svojstava, te njena svojstva značajno određuju ponašanje kompozita. [1]

2.2.1 Polimerne matrice

Polimerni matrice su u brodogradnji najviše korišteni tip matrica. Polimerne matrice mogu biti:

- **Plastomerne** – PA-poliamid, PE-polietilen, PP-polipropilen, visokotemperaturni plastomeri (PEEK, PPS)
- **Duromerne** – poliesterske smole, epoksidne smole, vinil-esterske smole, fenolne smole, itd.)

Polimerne matrice povezuju komponente i određuju termotehničku postojanost kompozita, štite ojačavalo od trošenja/abrazije i okoline, pomažu pri raspodjeli nametnutog opterećenja budući da prenose naprezanja, te daju trajnost, međuslojnu žilavost i smičnu čvrstoću sustavu. [6]

Duromeri pri zagrijavanju stvaraju ireverzibilne kemijske veze među polimernim lancima koji su međusobno snažno umreženi. Pri ponovnom zagrijavanju, oni ne mijenjaju stanje već ostaju kruti sve dok se pod djelovanjem visoke temperature potpuno ne razgrade. To znači da ih nije moguće reciklirati već samo mehanički usitniti čime se dobivaju granule koje u sebi sadrže i vlakna i matricu. Za razliku od njih, plastomeri imaju svojstvo da se pri hlađenju stvrdnjavaju, ali se pri ponovnom zagrijavanju razmekšavaju te ih je moguće ponovno oblikovati što omogućuje popravljivanje dijelova koji su izrađeni od ovih kompozita kao i njihovo djelomično recikliranje.

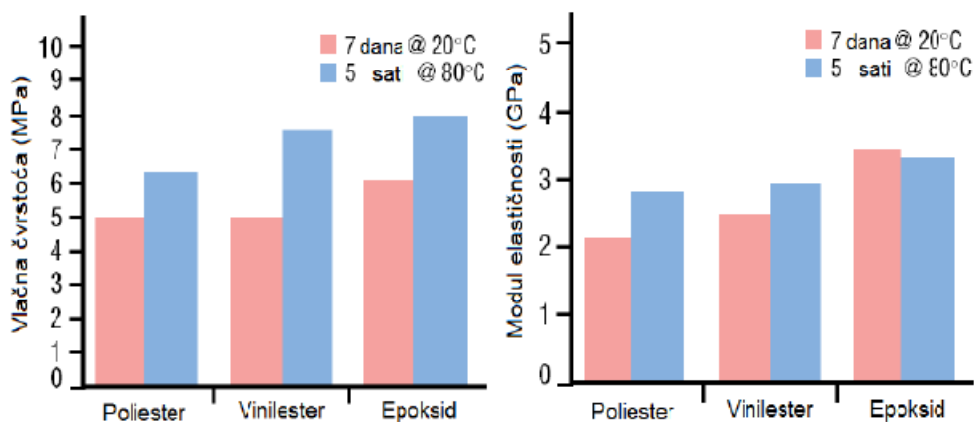
Duromerna matrica

Duromeri su polimeri koji se najčešće koriste kao matrice zbog relativno niže cijene, niskih proizvodnih temperatura, niske viskoznosti pri proizvodnji te dobrog oplakivanja vlakana. Najvažnije duromerne matrice su:

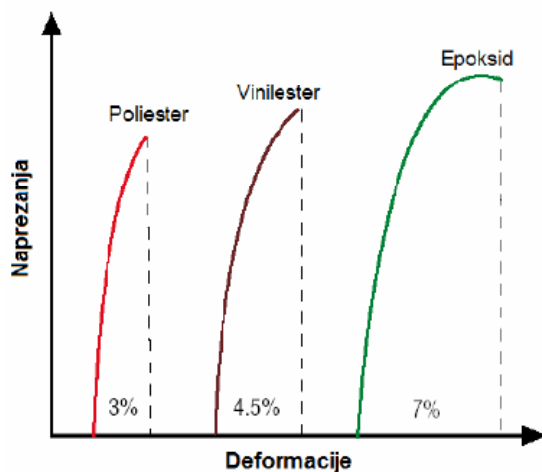
- Epoksidne smole (EP)
- Poliesterske smole (UP)
- Vinil-esterske smole
- Fenolne smole

Na sljedećim dijagramima mogu se vidjeti dva najvažnija svojstva smole, vlačna čvrstoća i krutost, različitih tipova smola te odnos naprezanja i deformacija do loma.

Dijagram 2.3 [3] Vlačna čvrstoća i modul elastičnosti različitih vrsta smola



Dijagram 2.4 [3] Naprezanje-deformacija do loma različitih vrsta smola



Epoksidne smole su najčešće upotrebljavane duromerne matrice zbog svojih dobrih mehaničkih svojstava, dobre postojanosti na agresivne medije, visoke toplinske postojanosti, lakog korištenja, a i dobro reagiraju s većinom vrsti vlakana. Glavni nedostaci jesu visoka cijena proizvodnje u odnosu na ostale vrste duromernih smola, osjetljivost na vlagu, sporo polemeriziranje, mala otpornost nekim organskim spojevima (organskim kiselinama i fenolima) te relativno niska najviša temperatura primjene.

Poliesterske smole (zasićeni poliesteri) su linearni lančani polimeri. Poliesteri su makromolekule na bazi diabazičnih kiselina (ortoftalna, izoftalna, tereftalna kiselina...) i diola kao što su etilen glikol, propilen glikol, nepontil glikol, bisfenol itd. Nezasićene poliesterske smole su najzastupljenije unutar grupe poliesterskih smola. [6]

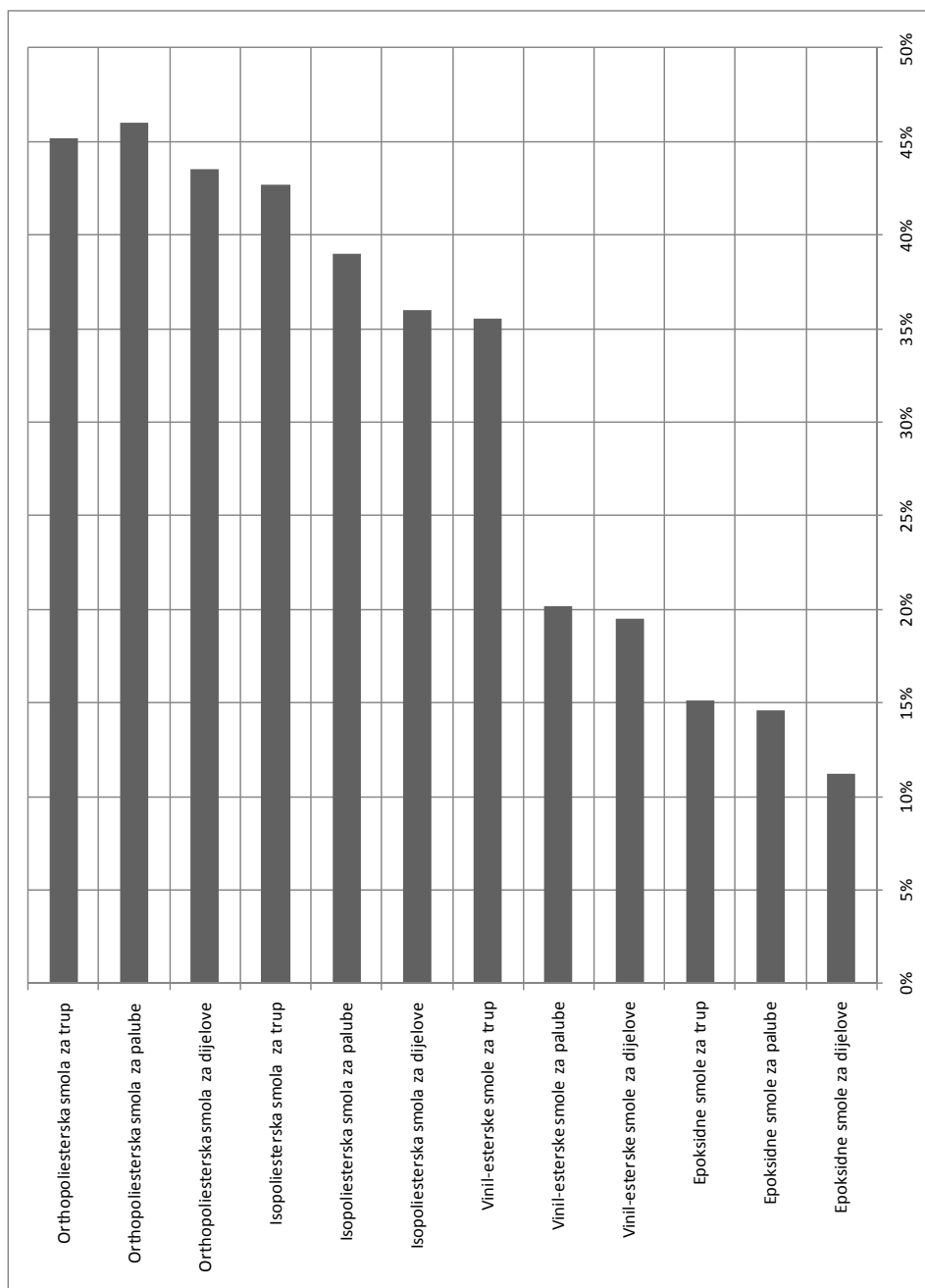
Odlikuju se nizom dobrih svojstava koja su im u kratkom vremenu omogućila brzi razvoj i široku primjenu u proizvodnoj industriji. Alati i kalupi su im jednostavni i razmjerno jeftini, a izrađuju se od gipsa metala, drva te od epoksidne i poliesterske smole. Mogu se prerađivati pri sobnoj temperaturi, a gotovi proizvodi su postojani i na visokim temperaturama. Glavne prednosti su ovih materijala jesu mala početna viskoznost, mala cijena početnih sirovina, jednostavna proizvodnja te izvrsna otpornost atmosferskim utjecajima. Loše svojstvo jest to da im je polimerizacija vrlo egzotermna s visokim skupljanjem čime se u procesu proizvodnje unose značajna zaostala naprezanja, krhkost te slaba kemijska otpornost prema nekim spojevima.

Vinil-esterske smole su po svojstvima između epoksida i poliestera. Polimerizacija se događa na relativno niskim temperaturama (kao kod poliestera), a konačna svojstva daju dobru kemijsku otpornost kao kod epoksida uz jednostavnu proizvodnju te bolja mehanička svojstva i bolje veze između vlakana i matrice u odnosu na poliestere. Imaju znatno veće troškove proizvodnje nego poliesterske smole te znatno veće skupljanje nego epoksidne smole. [3]

Fenolne smole su toplinski postojane, samogasive, te tvrde. Imaju povišenu postojanost prema utjecaju organskih otapala i kiselina. Nastaju polimerizacijom fenola uz pomoć npr. Formaldehida. Relativno su krhke i slabijih mehaničkih svojstava od epoksidnih i poliesterskih smola.

Najčešće korištene smole u brodogradnji su epoksidne, poliesterske i vinilesterske. Na dijagramu 2.5 [5] može se vidjeti upotreba različitih vrsta smola u brodogradnji.

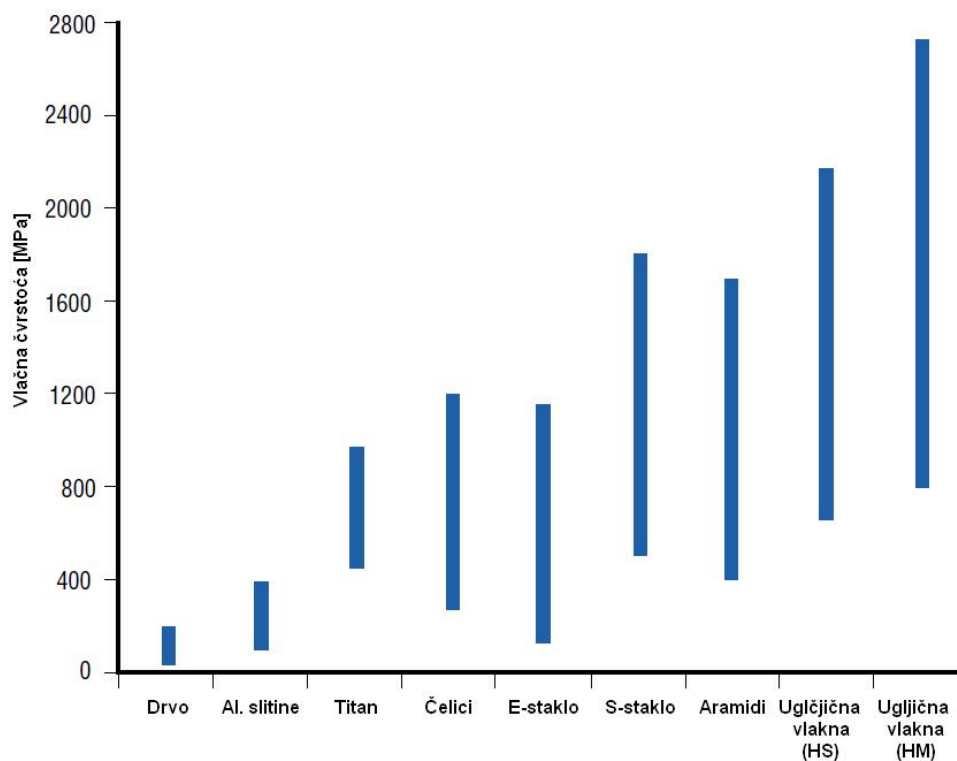
Dijagram 2.5 [5] Upotreba različitih vrsta smola u proizvodnji brodogradevnih dijelova

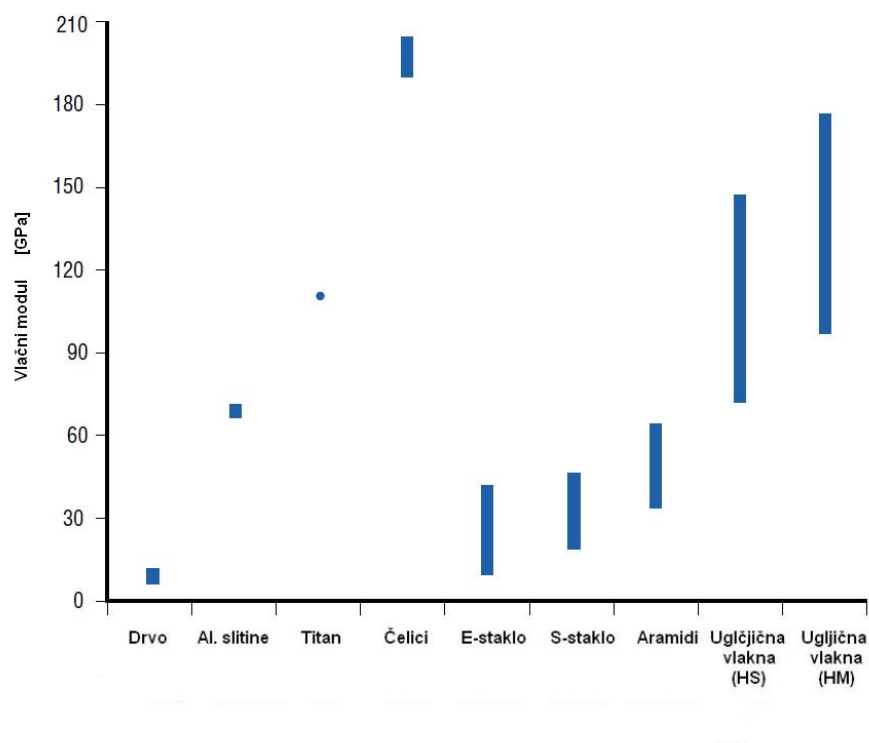


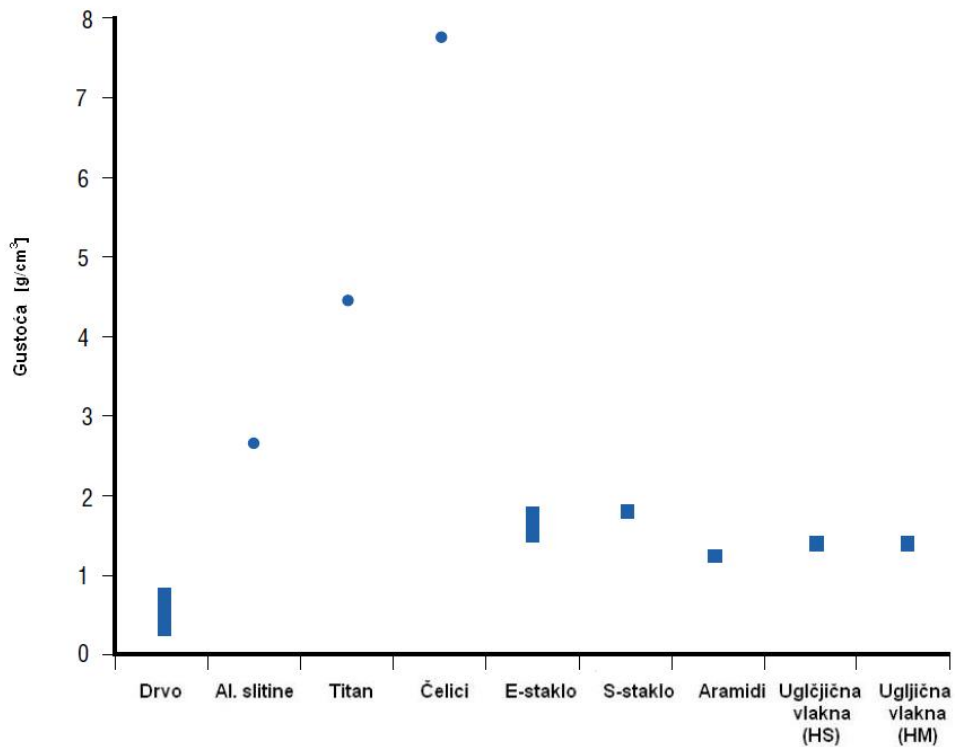
2.3 Usporedba vlaknima ojačanih kompozita sa ostalim konstrukcijskim materijalima

Kako bi predložili prednosti upotrebe kompozitnih materijala najbolje ih je usporediti sa ostalim konstrukcijskim materijalima u brodograđevnoj industriji. U usporedbama koje slijede prikazana su najvažnija mehanička svojstva kompozitnih materijala u usporedbi sa istim svojstvima ostalih konstrukcijskih materijala.

Dijagram 2.6 [3] vlačna čvrstoća različitih vrsta konstrukcijskih materijala



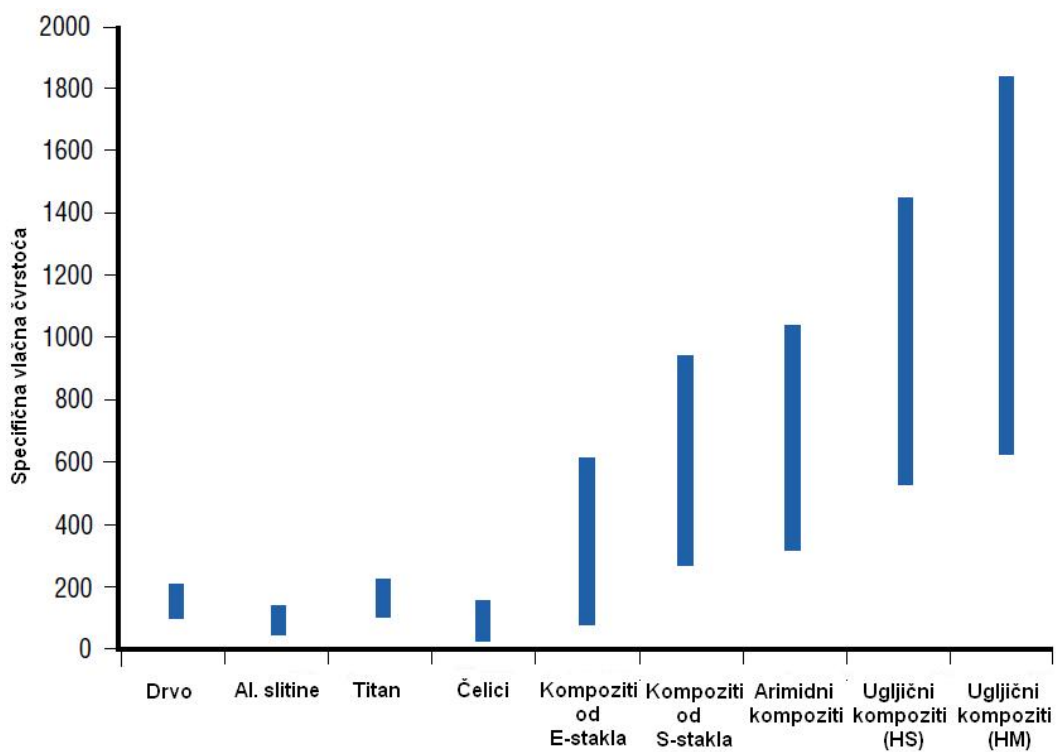
Dijagram 2.7 [3] vlačni modul različitih vrsta konstrukcijskih materijala

Dijagram 2.8 [3] specifična gustoća različitih vrsta konstrukcijskih materijala

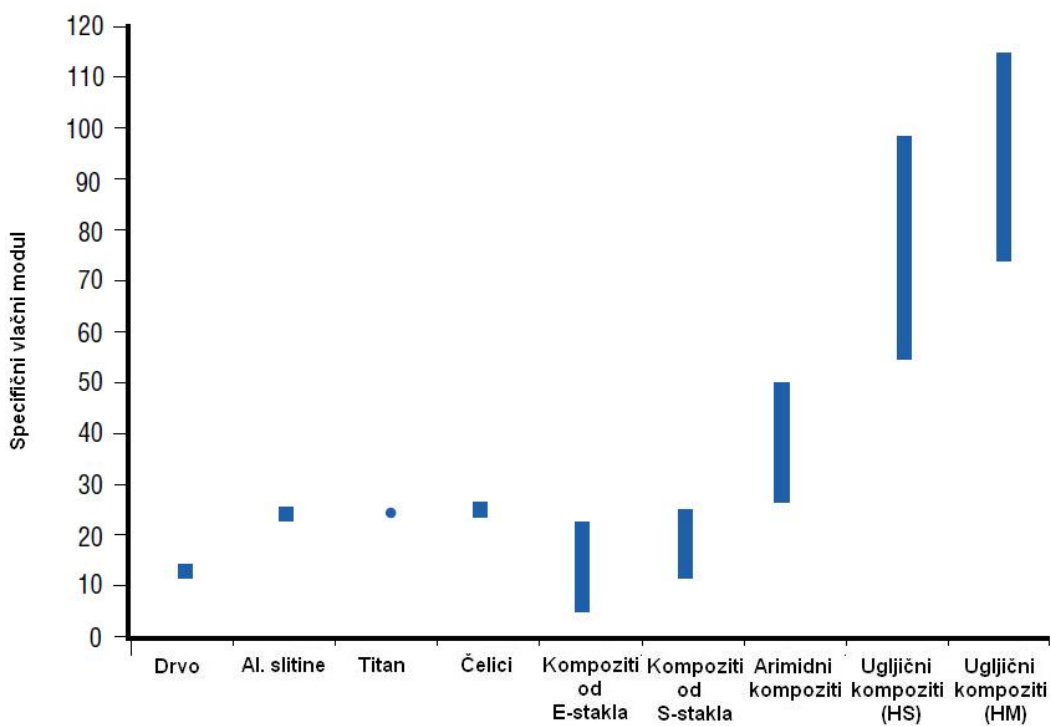
Prema dijagramima 2.6, 2.7 te 2.8 možemo reći da je njihova najvažnija prednost visoki omjer čvrstoća/težina što ih čini idealnim za tako puno različitih primjena. Pogotovo se to odnosi na mobilne strukture kao što su automobili, avioni i brodovi i to zbog toga što lakše strukture igraju značajnu ulogu u smanjenju potrebne jačine pogonskih uređaja, što dalje dovodi do ušteda u cijeni motora, njihovog održavanja i naravno potrošnje goriva, a time i smanjenju emisije stakleničkih plinova.

Omjer čvrstoća/težina kompozitnih materijala u odnosu na druge konstrukcijske materijala se najbolje može vidjeti preko specifične vlačne čvrstoće odnosno specifičnog modula kao što je prikazano na dijagramima 2.9 i 2.10. Specifična čvrstoća odnosno specifični modul dobijemo kada podijelimo mehanička svojstva materijala sa njihovom gustoćom.

Dijagram 2.9 [3] specifična vlačna čvrstoća različitih vrsta konstrukcijskih materijala



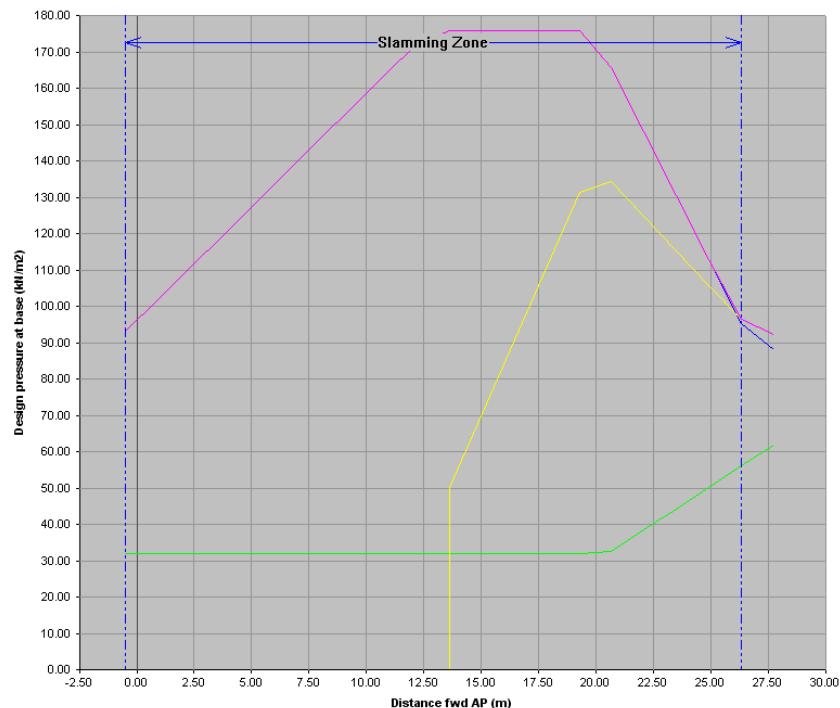
Dijagram 2.10 [3] specifična vlačni modul različitih vrsta konstrukcijskih materijala



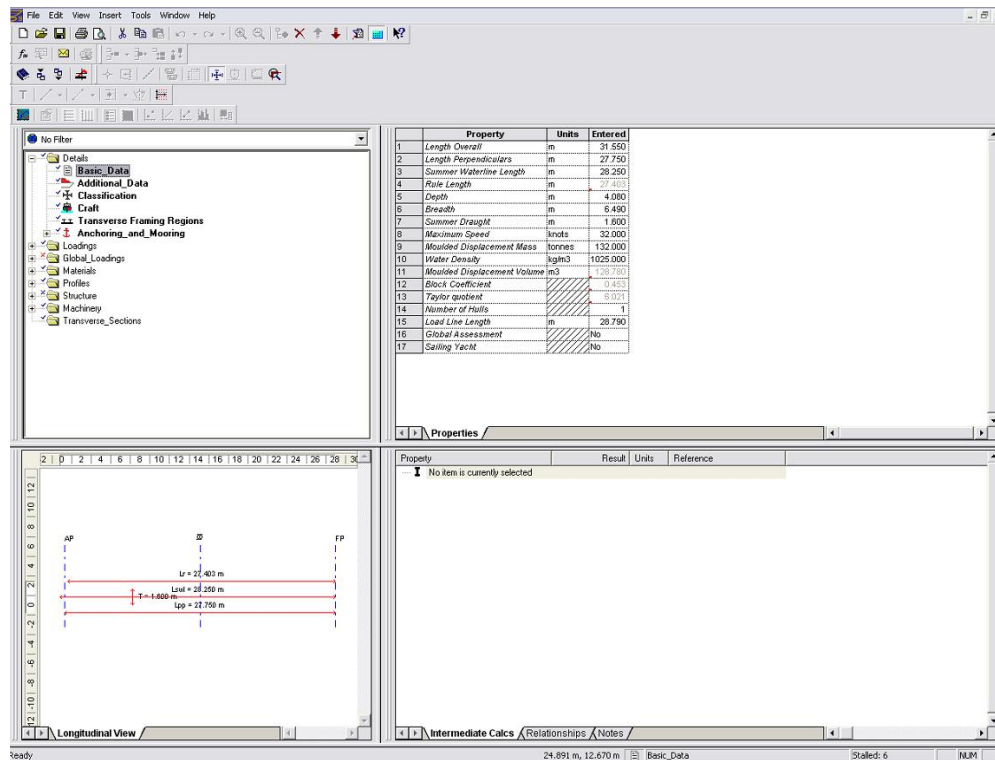
3. Računalni program Lloyds register SSC v5.0.4

Konstrukcija će se raditi u računalnom programu LR SSC v. 5.0.4. koji objedinjuje pravila za gradnju specijalnih tipova brodova (brzi brodovi, višetrupni brodovi, velike jahte, poludeplasmanske brodice) koje se grade od čelika, aluminijskih legura te kompozita. Računalni program LR SSC namijenjen je kako proračunu konstruktivnih elemenata trupa i nadgrađa, smještaju i opisivanju opreme i strojarne kroz pravila Lloyds registra za specijalne tipove brodova. Program objedinjuje pravila za tehnički nadzor i gradnju brodova te služi kao jednostavniji pristup konstrukciji broda prema pravilima registra.

Prvo je potrebno definirati glavne karakteristike broda kao što je opisivanje forme, odnosno glavnih dimenzija broda, područje plovidbe i hidrostatske karakteristike prema kojima program računa opterećenja. Kako izgleda opterećenje po duljini broda izračunato od strane programa može se vidjeti na slici 3.1. Projektni tlak je označen crvenom bojom dok je žutom bojom označen forebody impact pressure, a zelenom bojom je bojom označen tlak od posrtanja. Na slici 3.2 može se vidjeti glavni izbornik koji se nalazi sa lijeve strane dok je desna strana rezervirana za tablicu koja se odabere u izborniku, prva odabrana tablica upravo je i prikazana te ona služi za opisivanje forme



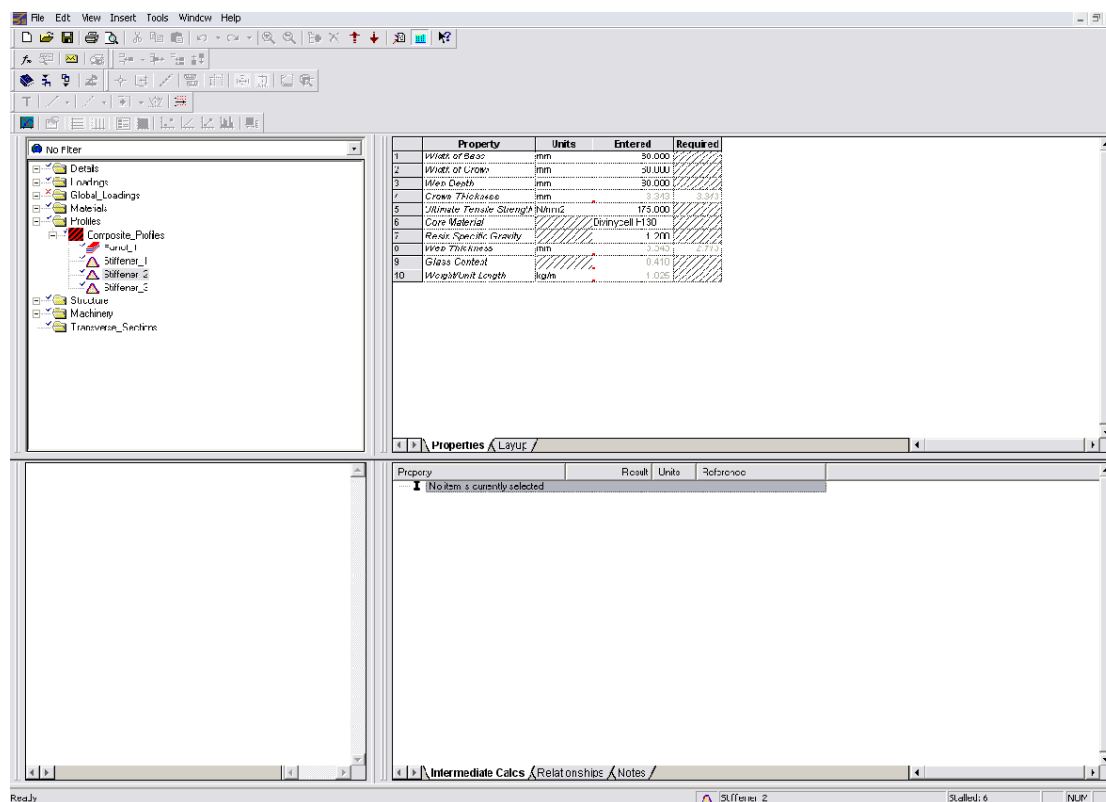
. Slika 3.1 Prikaz opterećenja na trup broda – LR SSC



. Slika 3.2 Prikaz izbornika za unos osnovnih podataka o plovilu

Kada je brod definiran glavnim dimenzijama i hidrostatikom, slijedi određivanje materijala gradnje. Softver dozvoljava različite materijale gradnje (čelik, aluminijske slitine, kompozitni materijali). Kod kompozitnih materijala ulazi se u područje definiranja vrste i količine gramature vlakana, ako se radi o sendvič konstrukcijama definira se i svojstvo jezgre odnosno ako se radi o izboru metalnih materijala definiraju se njihova glavna mehanička svojstva.

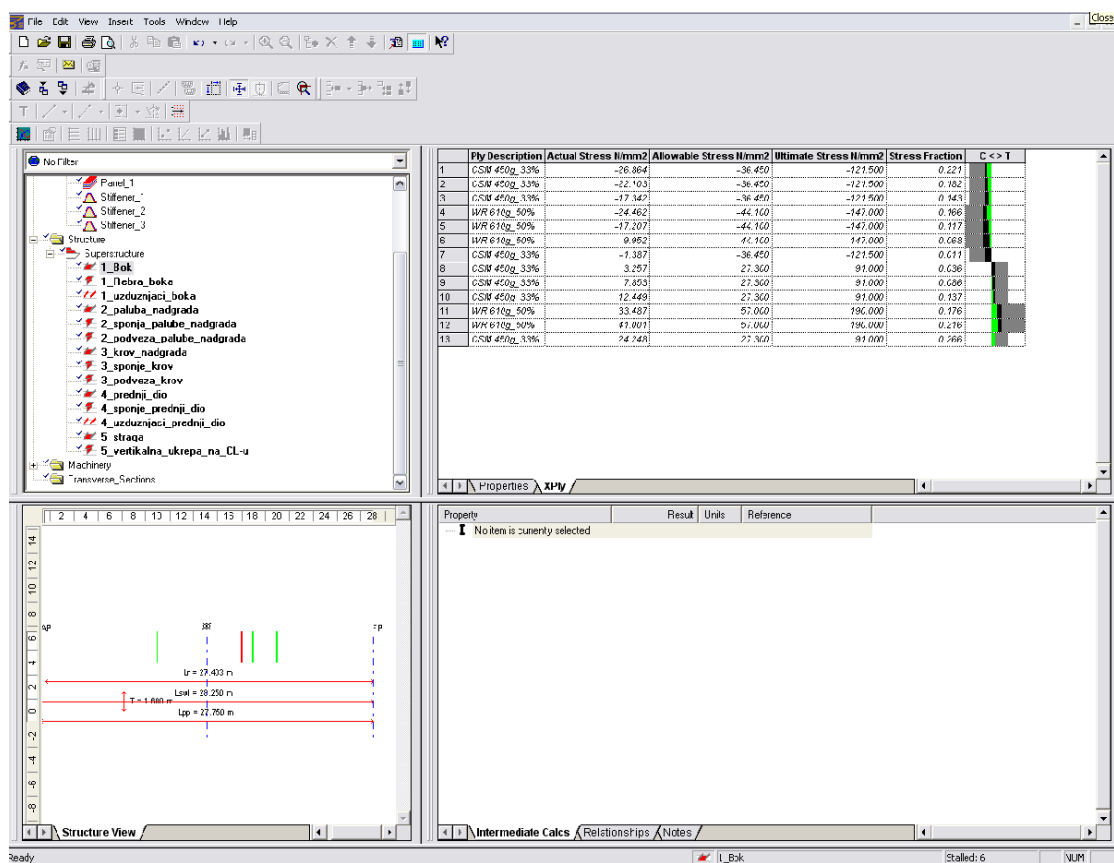
Kod kompozitnih materijala potrebno je definirati pojedine slojeve kao što su CSM-stakleni mat, WR-roving ili UD-unidirekciona vlakna. Nakon definiranja pojedinih slojeva potrebno je složiti laminate koji će se upotrebljavati u strukturi. Na gotovo isti način definiraju se i ukrepljenja sa razlikom što je kod njih potrebno definirati veličinu ukrepe i materijal ispune (ako postoji). Na slici 3.3 prikazan je izbornik za definiranje ukrepe od staklpolastičnog kompozita ispunjenog poliuretanskom pjenom.



. Slika 3.3 Prikaz izbornika za definiranje ukrepe

Kada su svi materijali i njihove karakteristike definirani može se pristupiti definiranju konstruktivnih elemenata. Tako se na slici 3.4 može vidjeti što je sve potrebno za definiranje oplata boka nadgrađa. To je uz već definirani laminat, razmak uzdužnih i poprečnih elemenata, pozicija mjesta koje promatramo u odnosu na osnovicu, i naravno, projektno opterećenje.

Isti princip kao za laminat koristi se i za provjeru naprezanja u ukrepljenjima, odnosno slojevima laminata oko ukrepljenja. Nakon što je proračun završen softver ispisuje izvještaj koji se šalje u registar na odobrenje.



Slika 3.4 Prikaz tablice usporedbe stvarnih i dozvoljenih napreznja

4. Konstrukcija nadgrađa od stakloplastike

4.1 Korišteni materijali

Laminat za izradu nadgrađa patrolnog broda sastoji se od staklenog mata, staklenog rovinga i poliesterske smole.

Stakleni mat (pust) je staklena armatura koja se sastoji od isjeckanih, nasumice razbacanih staklenih vlakana koja su međusobno slijepljena smolom. Izrađuje se u različitim debljinama, a masa mu se kreće od 230 do 920 g/m².

Prednosti mata su:

- Niska cijena po kvadratnom metru i debljinama
- Jednaka mehanička svojstva u svim pravcima
- Dobra međulaminarna veza zbog međusobno dobrog povezivanja niti susjednih slojeva
- Primjenjiv kod formiranja kompliciranih oblika

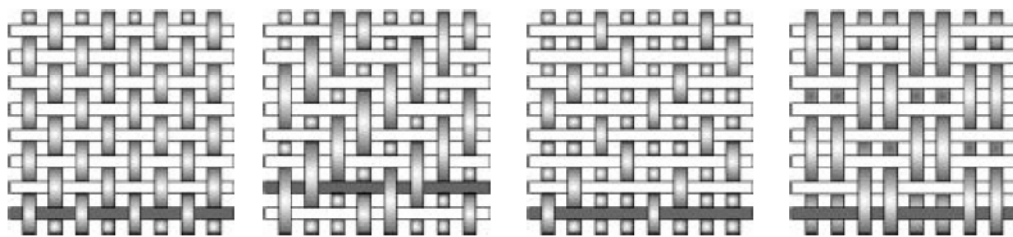
Nedostaci mata su:

- Debljina mata kod kontaktnog postupka ne može se stopostotno kontrolirati
- Kod poliesterskih laminata za vrijeme sušenja uslijed polimerizacije dolazi do stezanja pa krajnji sloj nije gladak nego se ocrtavaju vlakna
- Kod kontaktnog postupka laminati imaju manje stakla nego laminati od rovinga, što daje manji modul elastičnosti za jednake debljine
- Kod kontaktnog postupka zbog pomicanja niti za vrijeme nanošenja smole, sadržaj stakla je neravnomjerno raspoređen a kontrola nije jednostavna



Slika 4.1 Stakleni mat (pust)

Roving (hasura) je četvrtasto tkani materijal u dva međusobno okomita smjera. Niti su osnova i potka koje su od guste pređe širine 3 do 6 mm. Niti osnove i potke su isprepletene međusobno na način da svaka nit potke ide naizmjenično ispod i iznad osnove. Niti koje čine osnovu nešto su deblje od niti potke te mogu biti isprepletene na različite načine kao što se može vidjeti na slici 4.2 [3].



Slika 4.2 [3] Različite vrste tkanja rovinga

Prednosti Rovinga:

- Lako oblaganje kalupa i lako rukovanje kod ručnog kontaktnog postupka
- Dobivanje debljeg sloja laminata nego kod tkanine
- Dobiva se veći sadržaj stakla kod ručnog kontaktnog postupka
- Zbog guste pređe ima odličan otpor na udar

Nedostaci rovinga:

- Fine dovoljno kompaktne staklene niti pređe u hasuri su poteškoća za odstranjenje vlage kao i za impregniranje uz pomoć smole. Zbog toga se može stvoriti slaba veza između niti unutar pojedinih snopova pređe
- Grubo tkanje rovinga može zadržati mjehuriće zraka i stvoriti šupljine koje prouzrokuju porozne laminate koji omogućuju prodiranje vode. Ova pojava naročito se primjećuje kod tanjih laminata
- Velika usmjerena svojstva rovinga su ponekad i nedostatak zbog toga što pravci ojačanja kod rovinga su u pravcu potke i osnove. Čvrstoća između tih pravaca je znatno smanjena



Slika 4.3 Roving

Prema pravilima LR SSC za mat je minimalni zahtijevani postotak staklenog ojačanja $G_c = 0,33$, dok je za roving $G_c = 0,5$. Mehanička svojstva mata, odnosno hasure računaju se prema postotku staklenog ojačanja prema sljedećim izrazima :

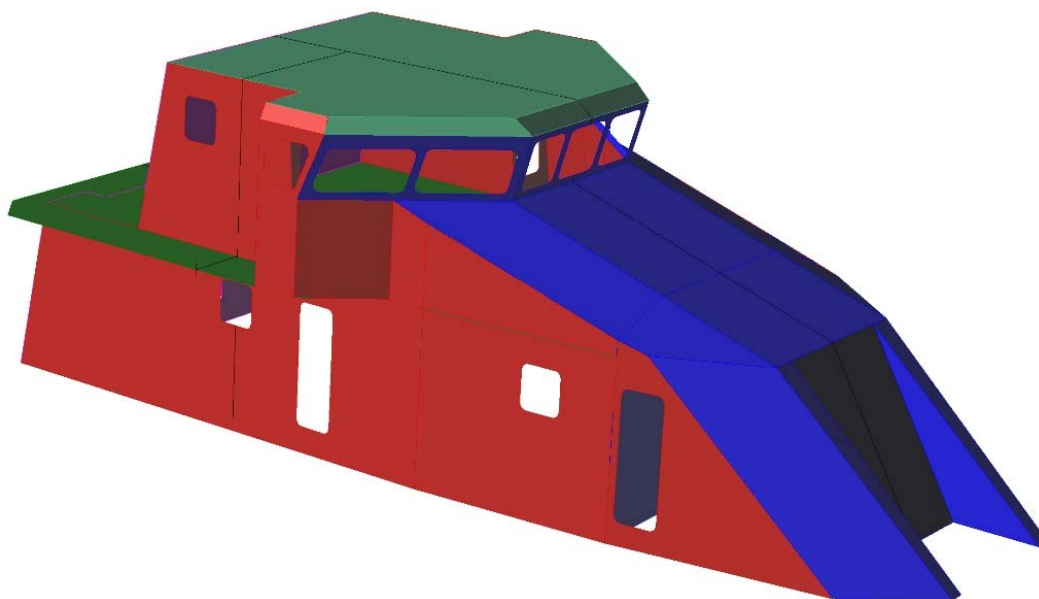
- Vlačna čvrstoća : $200G_c + 25 = 91,0 \text{ N/mm}^2$ - za mat ($G_c = 0,33$),
 $200G_c + 25 = 125,0 \text{ N/mm}^2$ - za roving ($G_c = 0,5$).
- Modul elastičnosti: $(15 \cdot G_c + 2) \cdot 10^3 = 6950 \text{ N/mm}^2$ - za mat ($G_c = 0,33$),
 $(15 \cdot G_c + 2) \cdot 10^3 = 12500 \text{ N/mm}^2$ - za roving ($G_c = 0,5$).
- Tlačna čvrstoća: $150G_c + 72 = 121,5 \text{ N/mm}^2$ - za mat ($G_c = 0,33$),
 $150G_c + 72 = 147 \text{ N/mm}^2$ - za roving ($G_c = 0,5$).
- Smična čvrstoća: $80G_c + 38 = 64,4 \text{ N/mm}^2$ - za mat ($G_c = 0,33$),
 $80G_c + 38 = 78 \text{ N/mm}^2$ - za roving ($G_c = 0,5$).
- Modul smika: $(1,7G_c + 2,24) \cdot 10^3 = 2801 \text{ N/mm}^2$ - za mat ($G_c = 0,33$),
 $(1,7G_c + 2,24) \cdot 10^3 = 3090 \text{ N/mm}^2$ - za roving ($G_c = 0,5$).

Za pust je odabrana gramature od 450 g/m^2 , dok je za roving odabrana gramatura od 610 g/m^2 .

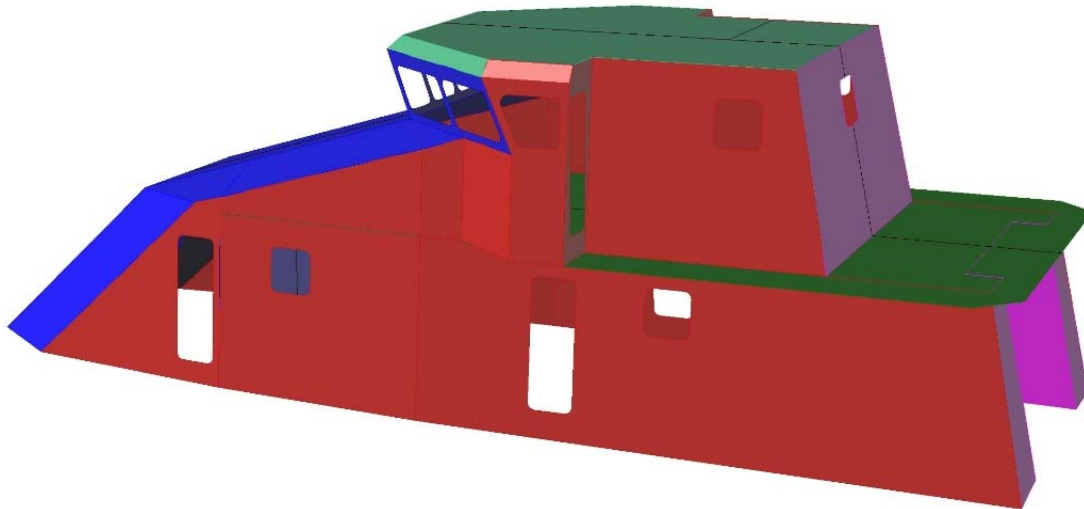
4.2 Proračun konstrukcije od stakloplastike

S obzirom na projektna opterećenja proračunata programskim paketom SSC LR, dijelimo nadgrađe na sljedeće grupe:

- Bok (Crveno)
- Paluba (Tamno zeleno)
- Krov (Svijetlo zeleno)
- Prednja strana (Plavo)
- Stražnja strana i prednja pregrada (Smeđe)



Slika 4.4 3-D model nadgrađa – pogled sprijeda



Slika 4.5 3-D model nadgrađa – pogled sa krme

Tablica 4.1 Konstrukcijski pritisci na pojedine dijelove strukture

Područje	Konstrukcijski pritisak kN/mm^2	
	Opločenje	Ukrepljenje
Bok	12,5	6,2
Pluba nadgrađa	7,8	3,9
Prednja strana	15,6	8,9
Stržnja strana	7,8	3,9
Krov	7,8	3,9

Strukturni elementi koji su korišteni za konstrukciju pojedinih grupa, kao što su podijeljeni u računalnom programu LR SSC su:

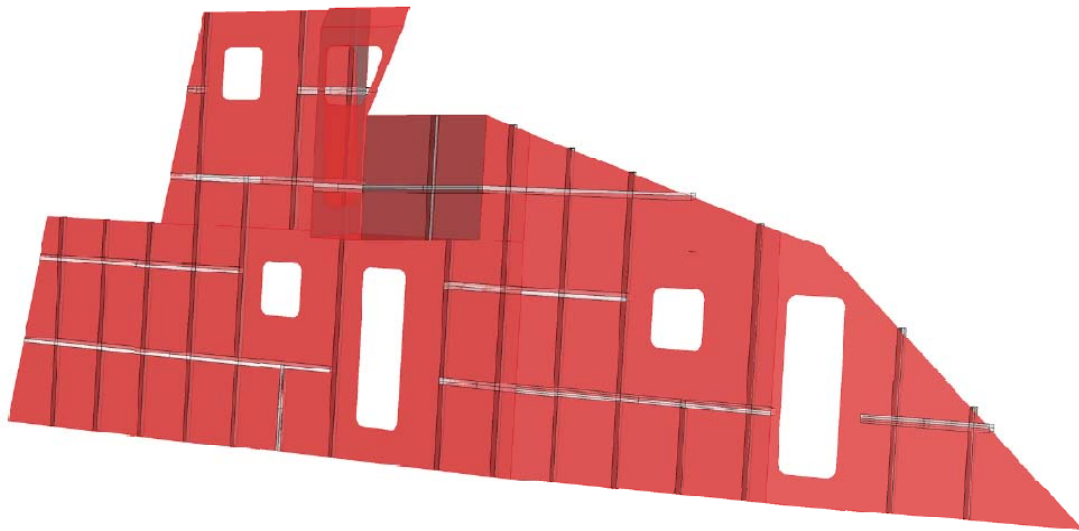
- Laminat_1 – sastoji se od 7 slojeva staklenog mata gramature 450 g/m^2 i 5 slojeva staklenog rovinga gramature 610 g/m^2 ukupne debljine 10,232 mm
- Laminat_2 – sastoji se od 13 slojeva staklenog mata gramature 450 g/m^2 i 8 slojeva staklenog rovinga gramature 610 g/m^2 ukupne debljine 18,058 mm
- Ukrepa_1 – dimenzija 60x40x60 mm, sa jezgrom Divinycell H130 pjene, 6 slojeva staklenog mata gramature 450 g/m^2 i 5 slojeva staklenog rovinga gramature 610 g/m^2
- Ukrepa_2 – dimenzija 80x60x80 mm, sa jezgrom Divinycell H130 pjene, 6 slojeva staklenog mata gramature 450 g/m^2 i 5 slojeva staklenog rovinga gramature 610 g/m^2

- Ukrepa_3 – dimenzija 85x70x85 mm, sa jezgrom Divinycell H130 pjene, 7 slojeva staklenog mata gramature 450 g/m² i 5 slojeva staklenog rovinga gramature 610 g/m²

Na sljedećim slikama mogu se vidjeti 3-d modeli pojedinih strukturnih grupa.

Bok se sastoji od sljedećih strukturnih elemenata:

- Oplata – Laminat_1
- Rebara boka - ukrepa_1 sa razmakom od 0,75m
- Uzdužnjaci - ukrepa_1 sa razmakom od 1 m

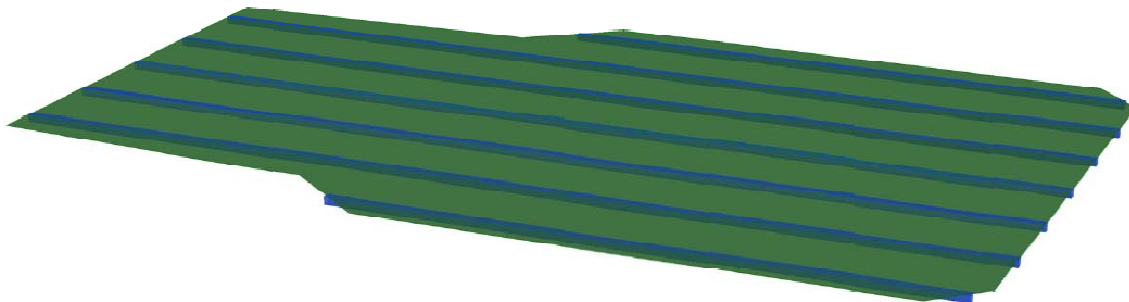


Slika 4.6 3-D model polovice strukture boka

Paluba je građena od sljedećih strukturnih elemenata:

- Oplata – Laminat_2
- Sponje – ukrepa_2 sa razmakom od 0.75 m

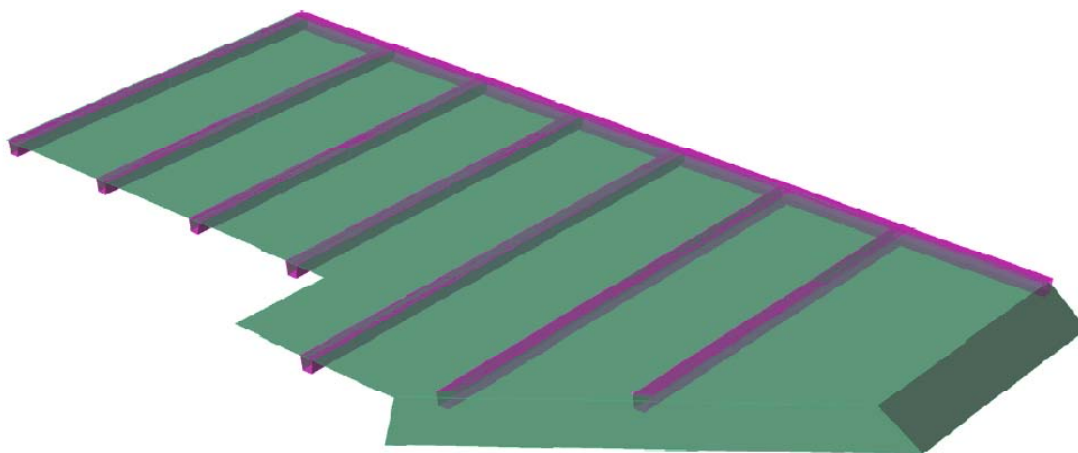
- Podveza – Ukrepa_2 na razmaku od 1 m



Slika 4.7 3-D model strukture palube

Krov nadgrađa je građen od sljedećih strukturnih elemenata:

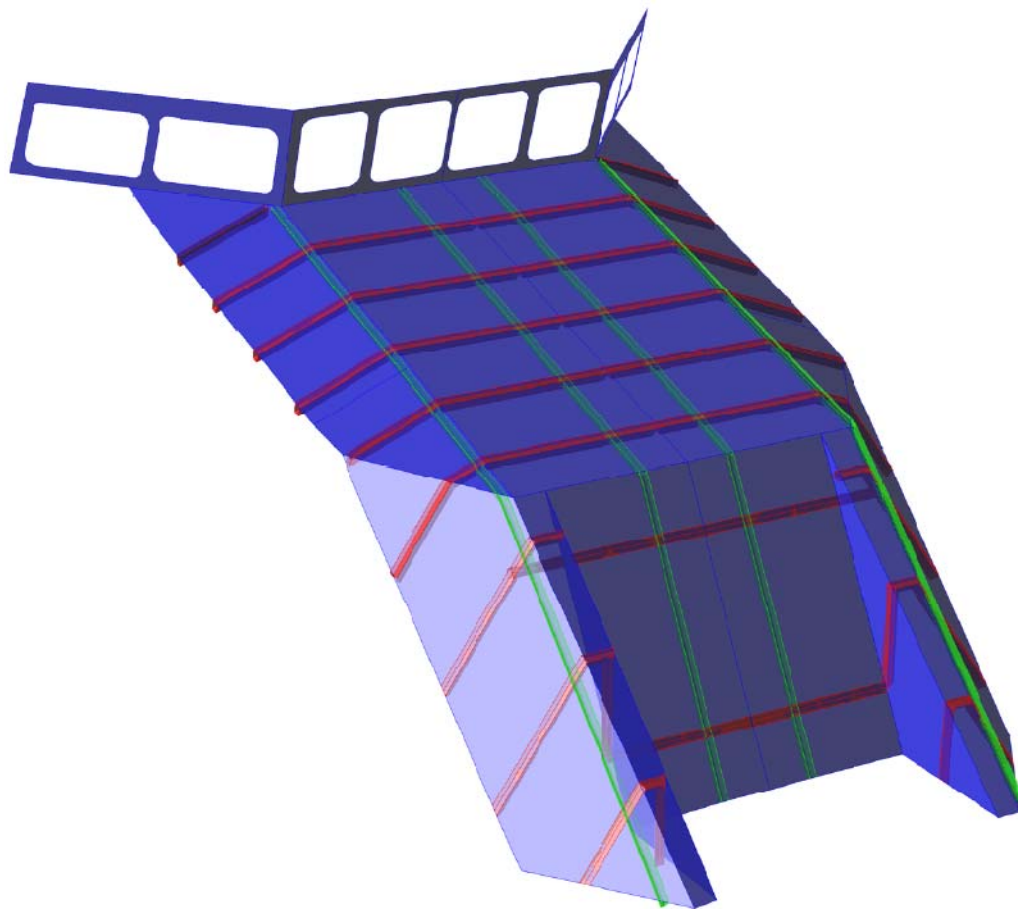
- Oplata – Laminat_1
- Sponje – Ukrepa_2 razmaknute 0,75 m
- Podveza – Ukrepa_2 na CL-u



Slika 4.8 3-D model strukture krova nadgrađa

Prednja strana se sastoji od sljedećih strukturnih elemenata:

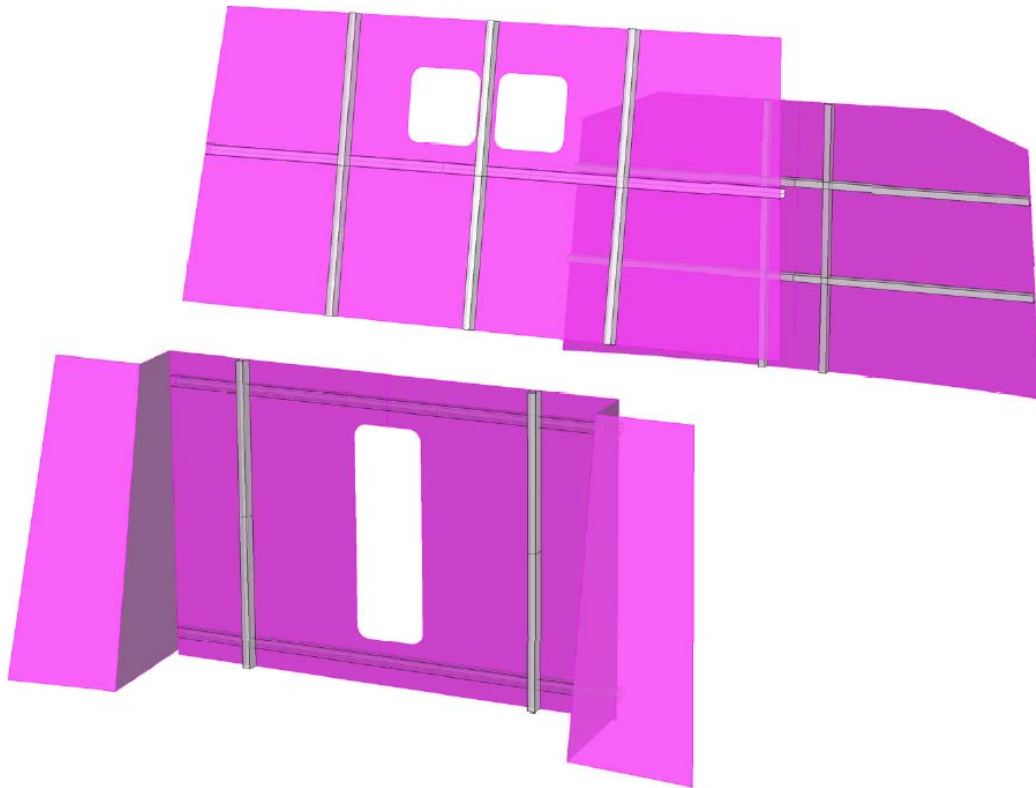
- Oplata – Laminat_1
- Sponje – Ukrepa_3 na razmacima od 0,75 m
- Uzdužnjaci – Ukrepa_1 na razmacima od 1,2 m



Slika 4.9 3-D model strukture krova nadgrada

Stražnji dio nadgrađa i pregrada u prednjem dijelu nadgrađa se sastoji od sljedećih strukturnih elemenata:

- Oplata stražnje dijela – Laminat_1
- Vertikalna ukrepa na CL-u – Ukrepa_3
- Horizontalne ukrepe – Ukrepa_1 na razmacima od 1 m



Slika 4.10 3-D model strukture stražnjeg dijela nadgrađa sa prednjom pregradom

Cijeli proračun, odnosno izvještaj se nalazi u prilogu na CD-u dok se konstrukcijski nacrti nalaze u Diplomskom radu po Prilozi.

5. Konstrukcija trupa od naprednog kompozita

5.1 Materijali i vrsta konstrukcije

Sendvič materijali (konstrukcije) sastoje se od tankih vanjskih slojeva spojenih ali i razdvojenih, s lakim materijalom za popunjavanje kao što je npr. polimerna pjena. Niti materijal za popunjavanje niti vanjski slojevi ne moraju biti čvrsti niti kruti a sendvič posjeduje ta oba svojstva [2].

Danas se koriste tri vrste materijala jezgre:

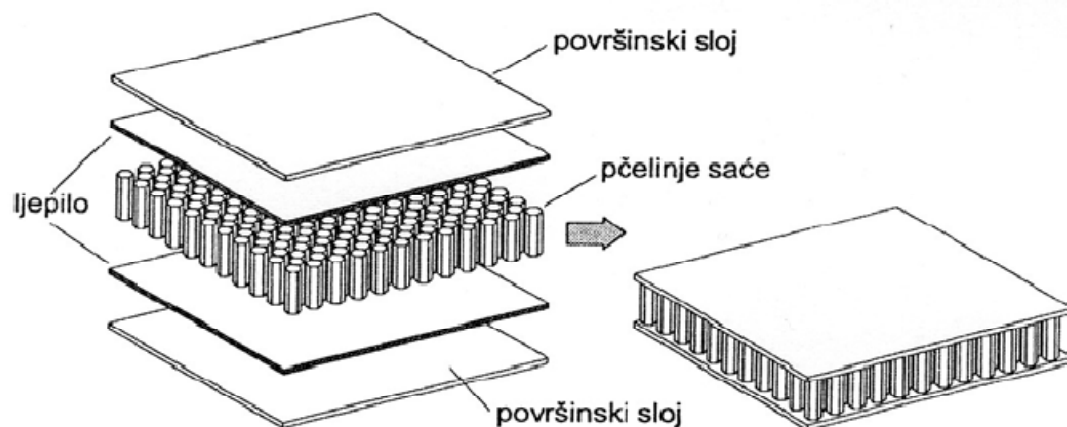
- Saćaste (honeycomb) strukture
- Polimerne pjene
- Sintaktički materijali

Polimerne pjene – Upjenjavati se može veći dio elastomernih, kao i neki duromerni materijali, međutim najviše se koriste u tu svrhu Polivinil-klorid (PVC) i polimetakrilimid, dok se rijede može naići i na polistiren i poliuretan. Gustoća i tlačna čvrstoća nekih pjenastih jezgri prikazana je tablicom 4.1 [5]

Tablica 5.1 [5] Gustoća i čvrstoća jezgri od polimernih pjena

Materijal	Gustoća (kg/mm ³)	Tlačna čvrstoća (Mpa)
PVC	80	0,65
	40	0,35
Polimetakrilimid	30	0,4
	50	0,9
	70	1,5
Poliuretan	64	0,38
Polistiren	32	0,24

Saćaste strukture – (honeycomb) se najčešće proizvode od različitih aluminijskih legura, staklenim vlaknima ojačanog kompozita, meta aramidnog papira, te raznih drugih celuloznih papira koji mogu biti impregnirani polimernom matricom [5]. Na slici 4. [13] možemo shematski izgled sendvič konstrukcije koja se sastoji od površinskih slojeva (laminata) i jezgre u obliku pčelinjeg saća.



Slika 5.1 [13] Shematski prikaz saćaste sendvič konstrukcije

Sintaktički materijali – se sastoje od polimera punjenih mikrosferama sa svrhom smanjivanja ukupne gustoće (mase) materijala. Za proizvodnju mikrosfera se koriste različite vrste materijala: staklo, keramika, polimeri i ugljik. Iako je lakše proizvest kuglice preferiraju se šuplje kuglice zbog svoje šupljine što rezultira manjom masom. U takvoj jezgri obično 40% - 50% volumnog udjela sačinjavaju mikrosfere, tako da specifična težina ukupnog materijala iznosi oko 0,64 što je povoljnije na od oko 1,5 za čisti polimerni materijal.

Kao najčešće korišten materijal jezgre su PVC pjene, pa će se i ovdje koristiti. Odabrana je PVC pjena Divinycell H100 čije karakteristike su sljedeće:

- Gustoća → 96 g/cm^3
- Vlačna čvrstoća → $3,1 \text{ MPa}$

- Modul elastičnosti → 105 MPa
- Tlačna čvrstoća → 1,7 MPa
- Tlačni modul → 124,97 MPa
- Smični modul → 1,33 MPa
- Smična čvrstoća → 1,4 MPa

Kao Površinski sloj koristit će se laminat od E-stakla u slojevima mata gramature 450 g/m² i rovinga gramature 610 g/mm² povezan poliesterskom smolom. Na slici 5.2 može se vidjeti kako izgleda već gotova jezgra debljine 50 mm koja se ugrađuje između laminata.



Slika 5.2 Divinycell H100 – jezgra

5.1 Proračun konstrukcije od sendvič kompozita

Nadgrade ostaje podijeljeno prema opterećenjima kao na slici 4.4, odnosno konstrukcijski pritisci su jednaki kao i u tablici 4.1. Sastav sendvič strukture, debljine pojedinih slojeva i mehaničke karakteristike materijala kako su definirani u računalnom programu LR SSC mogu se vidjeti na slici 5.4. Kao što se vidi sendvič konstrukcija je sastavljena od Divinycell jezgre debljine 50 mm, te stakloplastičnog laminata sastavljenog od 4 sloja staklenog ojačanja (tri sloja mata-CSM i jedan sloj rovinga-WR), ukupna debljina sendvič panela je 57,1 mm. Na slici 5.3 može se vidjeti sastav profila koji je korišten za izradu okvira kako je definiran u računalnom programu LR SSC.

	Descriptio	Fibre Type	Fibre Content	Thickness (mm)
1		CSM_450g/m2	0.330	0.937
2		CSM_450g/m2	0.330	0.937
3		WR_610g/m2	0.500	0.747
4		CSM_450g/m2	0.330	0.937
5		CSM_450g/m2	0.330	0.937
6		WR_610g/m2	0.500	0.747
7		CSM_450g/m2	0.330	0.937
8		CSM_450g/m2	0.330	0.937
9		WR_610g/m2	0.500	0.747
10		CSM_450g/m2	0.330	0.937
11		CSM_450g/m2	0.330	0.937

Slika 5.3 Struktura profila sa debljinama

	Description	Fibre Type	Fibre Content	Thickness (mm)	Compressive Modulus (N/mm2)
1		CSM_450g/m2	0.330	0.937	7200.000
2		WR_610g/m2	0.500	0.747	14000.000
3		CSM_450g/m2	0.330	0.937	7200.000
4		CSM_450g/m2	0.330	0.937	7200.000
5		Divinycell_H100		50.000	105.000
6		CSM_450g/m2	0.330	0.937	7200.000
7		CSM_450g/m2	0.330	0.937	7200.000
8		WR_610g/m2	0.500	0.747	14000.000
9		CSM_450g/m2	0.330	0.937	7200.000

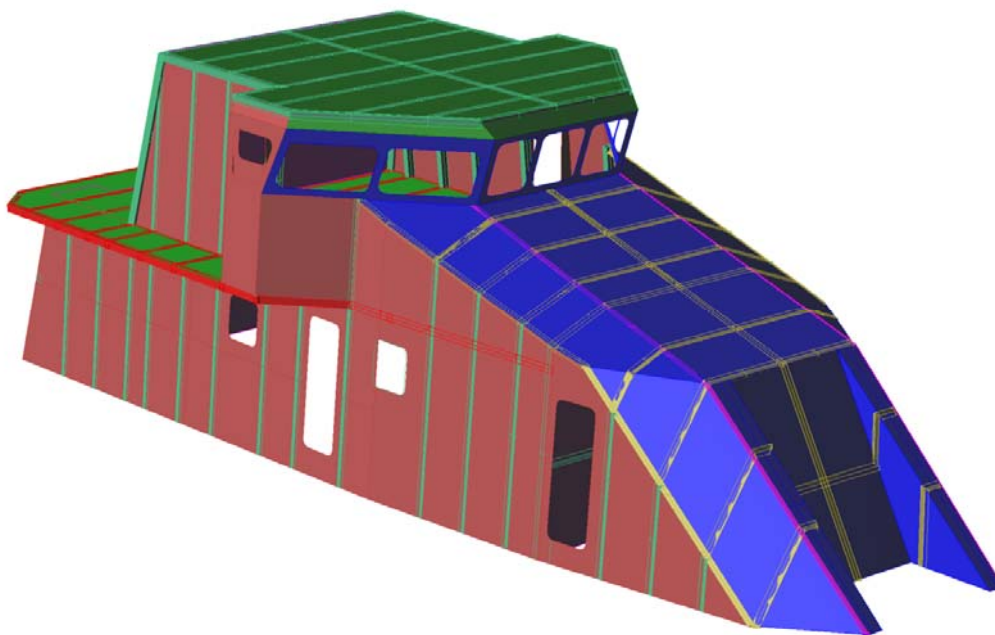
Tensile Modulus (N/mm2)	Ultimate Compressive Strength (N/mm2)	Ultimate Tensile Strength (N/mm2)
6950.000	121.500	91.000
14500.000	147.000	190.000
6950.000	121.500	91.000
6950.000	121.500	91.000
105.000	3.100	3.100
6950.000	121.500	91.000
6950.000	121.500	91.000
14500.000	147.000	190.000
6950.000	121.500	91.000

Slika 5.4 Struktura Sendviča sa debljinama i mehaničkim karakteristikama pojedinog sloja

Prema proračunu cijelo nadgrađe, odnosno opločenje svih dijelova nadgrađa, je od istog sendvič profila. Okvir je također sastavljen od istog profila dimenzija 100x80x100 mm laminiranog od stakloplastike, slojevi su prikazani na slici 5.3, ispunjenog Divinycell pjenom. U tablici 5.2 prikazano je od kojih strukturnih elemenata se sastoji pojedina grupa te kako su raspoređeni pojedini elementi. Postoje još i uzdužne ukrepe koje se nalaze na prednjoj strani, zbog najvećeg tlaka. Na slici 5.4 može se vidjeti 3-D model polovice nadgrađa od sendvič strukture.

Tablica 5.2 Struktura nadgrada

	Element	Razmak Ukrepe/Debljina Laminata
BOK	Opločenje	Sendvič struktura ukupne debljine 57,1 mm (50 mm jezgra i 7,1 mm površinskog sloja)
	Rebro	Okvir (100x80x100) na razmacima od 750 mm
PALUBA	Oplata	Sendvič struktura ukupne debljine 57,1 mm (50 mm jezgra i 7,1 mm površinskog sloja)
	Sponja	Okvir (100x80x100) na razmacima od 750 mm
	Podveza	Okvir (100x80x100) na CL
KROV	Oplata	Sendvič struktura ukupne debljine 57,1 mm (50 mm jezgra i 7,1 mm površinskog sloja)
	Sponja	Okvir (100x80x100) na razmacima od 750 mm
	Podveza	Okvir (100x80x100) na CL
PREDNJA STRANA	Oplata	Sendvič struktura ukupne debljine 57,1 mm (50 mm jezgra i 7,1 mm površinskog sloja)
	Rebro	Okvir (100x80x100) na razmacima od 750 mm
	Podveza	Okvir (100x80x100) na CL
	Uzdužni nosači	Ukrepa (80x60x80) na razmacima od 1000 mm
STRAŽNJA STRANA	Oplata	Sendvič struktura ukupne debljine 57,1 mm (50 mm jezgra i 7,1 mm površinskog sloja)
	Horizontalne ukrepe	Ukrepa (80x60x80) na razmacima od 1000 mm
	Vertikalna ukrepa	Ukrepa (1000x80x1000) na CL



Slika 5.5 3-D model konstrukcije nadgrađa od sendvič konstrukcije

Cijeli proračun, odnosno izvještaj se nalazi u prilogu na CD-u dok se konstrukcijski nacrti nalaze u Diplomskom radu pod prilog.

6. Masa i centracija

6.1 Masa i centracija stakloplastičnog nadgrađa

Za izračun mase i proračun centracije prema podacima izračunatim računalnim programom LR SSC, a to su masa po jednom metru kvadratnom za panele i masa po jednom metru duljine za ukrepe, potreban izrađen je model nadgrađa prema dostupnim nacrtima. Ti podaci iz LR SSC se mogu jasno vidjeti na slici 5.1 gdje je prikazana tablica iz koje se može očitati da je specifična masa laminata (**Laminat_1**) **15,545 kg/m²**.

	Property	Units	Entered
1	Compressive Modulus	N/mm2	9640.287
2	Thickness	mm	10.232
3	Tensile Modulus	N/mm2	9659.437
4	Ultimate Flexural Strength	N/mm2	185.368
5	Glass Content		0.396
6	Weight/Unit Area	kg/m2	15.545
7	Resin Specific Gravity		1.200

Slika 6.1 Tablica sa svojstvima laminata izračunata računalnim programom LR SSC

Mogu se pročitati još mehanička svojstva laminata kao što su:

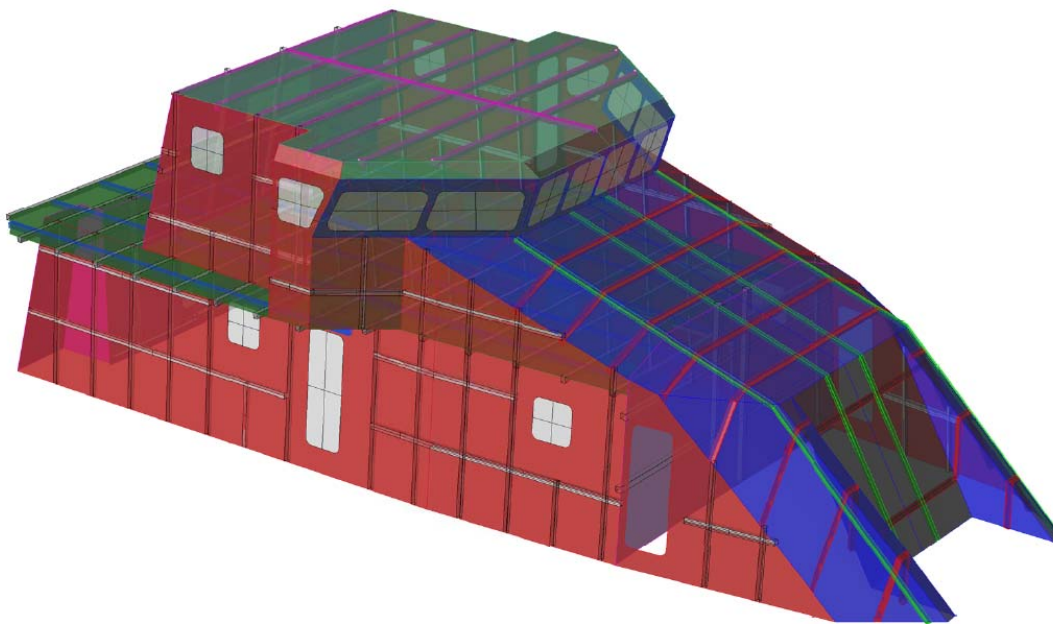
- Tlačni modul (Compressive Modulus)
- Vlačni modul (Tensile Modulus)
- Modul elastičnosti (Ultimate flexular strenght)
- Postotak stakla u laminatu (Glass content)

Na slici 5.2 možemo vidjeti 3-d model konstrukcije nadgrađa iz kojega su izvučene površine, odnosno duljine i težišta.

U Tablici mase i centracije se mogu vidjeti sljedeći podaci:

- element konstrukcije nadgrađa,
- vrsta elementa,

- površina odnosno težina elementa,
- specifična težina,
- masa,
- položaj težišta
- Momenti oko osi x odnosno y



Slika 6.2 3-D model nadgrađa od stakloplastike za proračun masa i centraciju

Tablica 6.1 Masa i centracija nadgrađa od stakloplastike

Rn broj	KONSTRUKCIJA NADGRAĐA	Vrsta elementa	Površina (m ²)	Duljina (m)	Specifična težina po površini (kg/m ²)	Specifična težina po duljini (kg)	Masa (kg)	x(m)	z(m)	Mx(kgm)	Mz(kgm)
1.	Oplata Boka	Laminat_1	83,2		15,545		1293,3	14,0	6,1	18141,7	7849,3
2.	Rebra Boka	Ukrepa_2		83,1		1,566	130,1	13,9	5,8	1802,6	760,1
3.	Uzdužnejci Boka	Ukrepa_2		42,3		1,566	66,2	13,1	6,5	866,1	431,9
4.	Oplata Palube	Laminat_2	56,5		15,545		878,3	13,1	6,5	11482,8	5726,5
5.	Sponje palube	Ukrepa_2		86		1,566	134,7	12,9	6,5	1743,8	873,1
6.	Uzdužnjaci palube	Ukrepa_2		74,2		1,566	116,2	13,1	6,5	1517,7	753,2
7.	Oplata Krova	Laminat_1	25,1		15,545		390,2	13,8	8,9	5186,7	3459,7
8.	Sponje Krova	Ukrepa_2		34,3		1,566	53,7	13,3	8,9	714,0	476,3
9.	Podveza Krova	Ukrepa_2		10,9		1,566	17,1	13,7	8,9	233,6	151,4
10.	Oplata Sprijeda	Laminat_1	37,8		15,545		587,6	19,2	6,5	11306,6	3821,8
11.	Sponje Sprijeda	Ukrepa_3		40,4		1,566	63,3	19,6	6,4	1237,6	402,0
12.	Uzdužnjaci Sprijeda	Ukrepa_2		19,1		1,566	29,9	19,5	6,4	584,7	192,5
13.	Oplata prema krmi	Laminat_1	36,8		15,545		572,1	12,6	6,0	7233,6	3450,6
14.	Vertikalna ukrepa na CL	Ukrepa_3		20,4		1,566	31,9	12,1	6,6	386,4	211,1
15.	Horizontalne ukrepe	Ukrepa_1		22,3		1,566	34,9	13,7	6,0	478,9	209,9
Ukupno:							4399,6	14,3	6,5	62916,7	28769,4

Na to još moramo dodati masu Gelcoat-a. Gelcoat je zaštitno dekorativni sloj laminata. Osim što daje laminatu odgovarajući sjaj i boju o njemu ovisi i trajnost odljevka iz stakloplastike jer je on izložen raznim nečistoćama, udarima, sunčevim zrakama, abraziji i drugim mehaničkim djelovanjima. Kao zaštitni dekorativni sloj odabran je Vapal 4780 gelcoat koji ima masu po jednom metru kvadratnom od 700 g/m^2 . Ako znamo da nam je površina laminata na koji se nanosi gelcoat 203 m^2 lako se dobije masa gelcoat-a od $142,1 \text{ kg}$ što daje ukupna masa stakloplastičnog nadgrađa je $4541,7 \text{ kg}$.

6.2 Masa i centracija nadgrađa od Sendvič konstrukcije

Kao i u prethodnom poglavlju masu ćemo dobit pomoću podataka izračunatih u LR SSC. Na sljedećim slikama mogu se vidjeti tablice sa površinskom gustoćom za oplatu, odnosno sendvič laminat, te duljinska masa za ukrepe.

	Property	Units	Entered
1	Compressive Modulus	N/mm2	8626.900
2	Thickness	mm	57.116
3	Tensile Modulus	N/mm2	8534.278
4	Ultimate Flexural Strength	N/mm2	175.172
5	Glass Content		0.369
6	Weight/Unit Area	kg/m2	10.627
7	Resin Specific Gravity		1.200

Slika 6.3 Tablica sa svojstvima sendvič laminata (LR SSC)

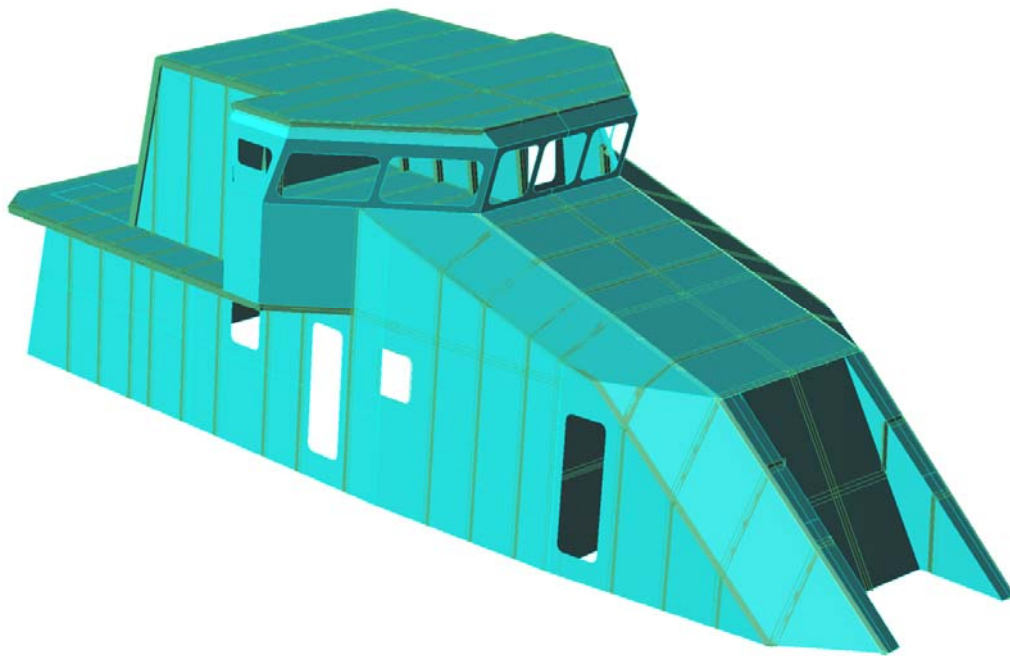
	Property	Units	Entered	Required
1	Width of Base	mm	100.000	
2	Width of Crown	mm	80.000	
3	Web Depth	mm	100.000	
4	Crown Thickness	mm	8.609	8.609
5	Ultimate Tensile Strength	N/mm2	3.100	
6	Core Material		Divinczell_H100	
7	Resin Specific Gravity		1.200	
8	Web Thickness	mm	8.609	3.210
9	Glass Content		0.394	
10	Weight/Unit Length	kg/m	3.440	

Slika 6.4 Tablica sa svojstvima Okvira (LR SSC)

Proračun masa i centracija je proveden kao i kod stakloplastičnog nadgrađa osim što su promijenjene vrste elemenata i njihova svojstva. Kao što se vidi na gornjim slikama jedinična masa pojedinih elementa je kako slijedi:

- Sandwich – 12,722 kg/m²
- Ukrepa – 00,642 kg/m

Tablica masa i centracija nalaze se na sljedećoj stranici. Kao što se može vidjeti u njoj nisu kao kod stakloplastčne konstrukcije razdvojene ukrepe, to je zato jer su kod sendvič konstrukcije okviri rađeni od istog profila iste jedinične mase. Na sljedećoj slici može se vidjeti model nadgrađa iz kojega si izvađene površine i težišta za proračun mase i centracije.



Slika 6.5 3-D model nadgrađa za proračun mase i centracije

Tablica 6.2 Masa i centracija nadgrada od Sendvič panela

Rn broj	KONSTRUKCIJA NADGRADA	Vrsta elementa	Površina (m ²)	Duljina (m)	Specifična težina po površini (kg/m ²)	Specifična težina po duljini (kg)	Masa (kg)	x(m)	z(m)	Mx(kgm)	Mz(kgm)
1.	Opločenje boka	Sandwich	86,2		10,672		919,9	14,1	6,1	12971,0	5611,6
2.	Rebra Boka	Okvir		84,3		3,44	290,0	13,8	5,9	4001,9	1711,0
3.	Opločenje Palube	Sandwich	56,5		10,672		603,0	13,1	6,5	7898,9	3919,3
4.	Sponje Palube	Okvir		83,2		3,44	286,2	13,3	6,5	3806,6	1860,4
5.	Podveza Palube	Okvir		31,5		3,44	108,4	13,6	6,5	1473,7	704,3
6.	Opločenje Krova	Sandwich	25,1		10,672		267,9	13,8	8,9	3696,6	2384,0
7.	Sponje Krova	Okvir		32,7		3,44	112,5	13,6	8,9	1529,8	1001,1
8.	Podveza Krova	Okvir		20,4		3,44	70,2	13,6	8,8	954,4	617,5
9.	Opločenje Sprijeda	Sandwich	37,8		10,672		403,4	19,3	6,4	7785,7	2581,8
10.	Rebra Sprijeda	Okvir		33,1		3,44	113,9	19,4	6,4	2209,0	728,7
11.	Jaki Uzdužni na CL	Okvir		22,4		3,44	77,1	19,1	6,4	1471,8	22,0
12.	Uzdužnjaci sprijeda	Ukrepa		15,3		2,67	40,9	19,8	6,4	808,8	261,4
13.	Opločenje straga	Sandwich	36,8		10,627		391,1	12,5	6,1	4888,4	2385,5
14.	Horizontalna ukrepa Straga	Okvir		14,6		3,44	50,2	12,2	6	612,7	301,3
15.	Vertikalna ukrepa na CL	Okvir		17,1		3,44	58,8	13,4	6,3	788,2	370,6
Ukupno:							3793,3	14,5	6,4	54897,4	24460,6

Ukupna masa strukture nadgrada od Sendvič konstrukcije iznosi 3800 kg. Što je još značajnija ušteda kada znamo da na to ne trebamo dodavati nikakvu izolaciju.

7. Protubalistička zaštita

Kako u diplomskom zadatku nisu precizno definirani zahtjevi prema kojem se treba izračunati protubalistička zaštita nadgrađa patrolnog broda, moramo prvo vidjeti moguće prijetnje na koje ovaj tip broda može naići. Pretpostavimo da je brod predviđen za potrebe hrvatske obalne straže. Kao takav brod glavne zadaće bi mu bile patroliranje nacionalnih voda i ZERP-a. U takvim uvjetima najčešće prijetnje predstavljaju skupine krijumčara droge i ljudi.

Kako je Hrvatska članica NATO-a tako možemo prema njihov standardima odrediti stupanj prijetnje, a u svezi sa time i zaštite. Standard koji se primjenjuje kao određivanje stupnja prijetnje odnosno zaštite za tu prijetnju je STANAG 4569 (Nato Standardization Agreement). STANAG 4569 koji je prvenstveno namijenjen za oklopna vozila, a u kojem se opisane procedure za ocjenjivanje stupnja zaštite za logistiku i laka oklopna vozila za određene prijetnje. U sljedećoj tablici mogu se vidjeti različiti stupnjevi zaštite i vrste prijetnje koje odgovaraju određenom stupnju zaštite (STANAG 4569).

Tablica 7.1 [5] Gustoća i čvrstoća jezgri od polimernih pjena

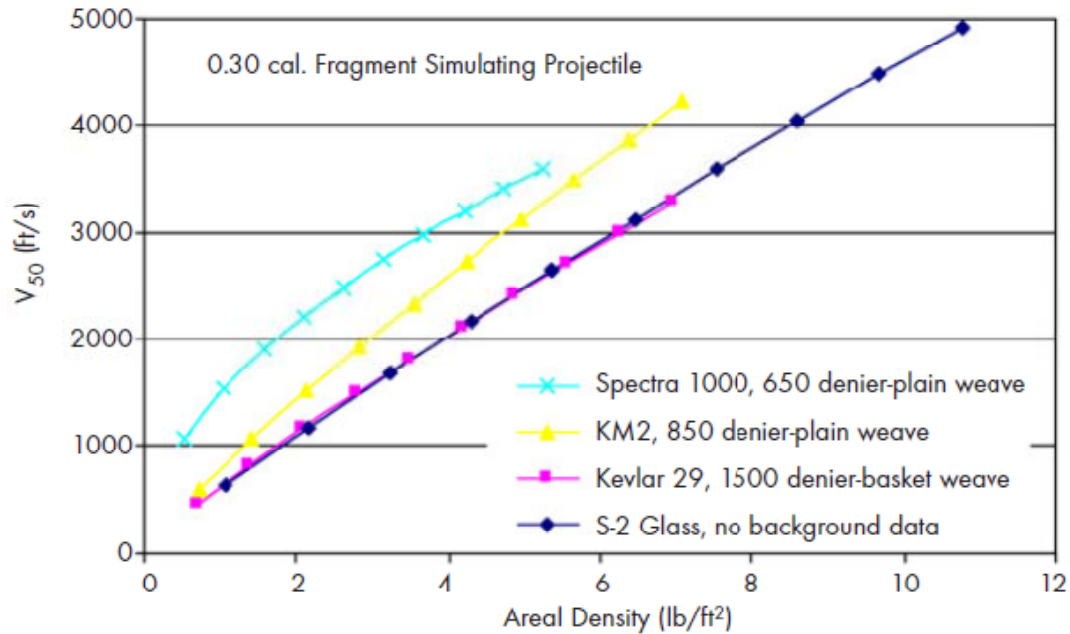
Stupanj prijetnje	Vrsta streljiva	Brzina (m/s)	Vrsta prijetnje
5	25mmx137 APDS-T, PMB 073	1258	Automatski top, APDS streljivo
4	14,5 mmx114 AP/B32	911	Teška strojica, AP streljivo
3	7,62 mmx51 AP (WC core)	930	Jurišna puška i snajper , AP streljivo sa WC jezgrom
3	7,62 mmx54R B32 API	854	Jurišna puška i snajper , AP streljivo sa WC jezgrom
2	7,62 mmx39 API BZ	695	Jurišna puška, AP streljivo sa čeličnom jezgrom
1	7,62 mmx51 NATO ball	833	Jurišna puška, obično streljivo
1	5,56mmx45 NATO ball	900	Jurišna puška, obično streljivo

Kako se radi o brodu za kontrolu nacionalnih voda te kojemu je glavna zadaća sprječavanja upadanju krijumčara i ribara u gospodarski pojas, kao prijetnja će e uzeti viši prvi stupanj, dakle jurišne puške sa običnim streljivom (7,62 mmx51 NATO ball). Na slici 6.1 [10] može se vidjeti slika jednog takvog metka karaj 5,56mmx45 NATO ball i AA baterije.

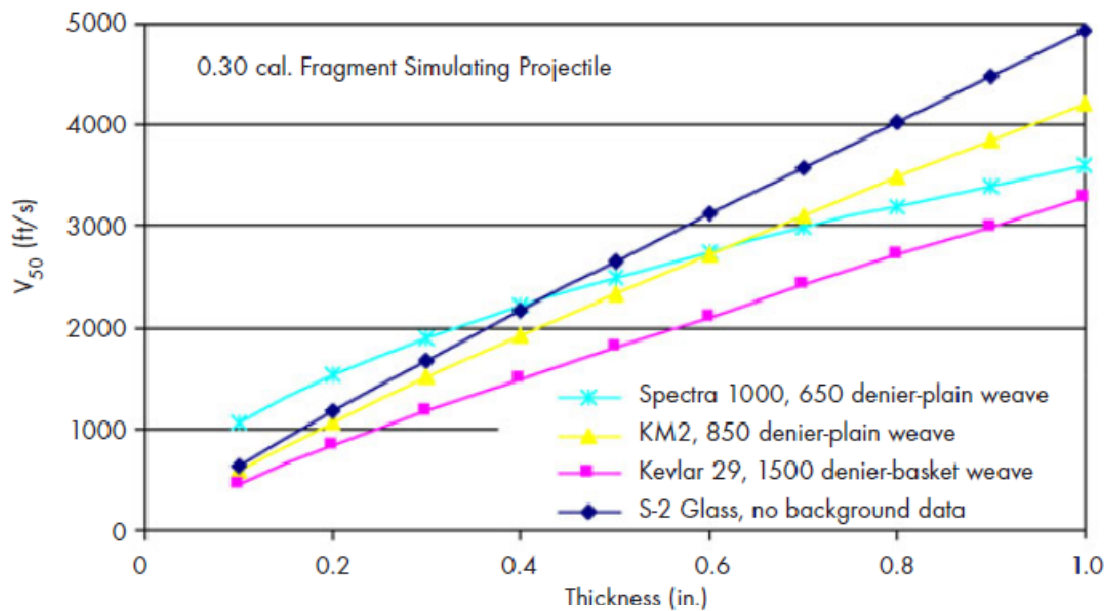


Slika 7.1 [10] Usporedba veličine streljiva sa AA baterijom

Stupanj protubalističke zaštite se prikazuje preko „V50“ brzine. „V50“ ili „Velocity 50%“ jest balistički test u kojem se višim i nižim brzinama ispaljuju metci sve dok ne počnu prodirati kroz materijal. Brzina metaka kod koje 50% metaka prodre kroz materijal, a 50 % ne prodre jest V50 brzina za taj stupanj balističke zaštite. Dakle V 50 je dobra gornja granica zaštite, odnosno „točka pucanja“ oklopa [11]. Na slici 6.3 i 6.4 [12] može se vidjeti dobiveni dijagram takvog testiranja za različite vrste vlakana s obzirom na gustoću i s obzirom na debljinu kompozita odnosno gustoću kompozita.

(a) V_{50} versus Areal Density

Slika 7.2 [12] Rezultati V50 testa s obzirom na gustoću za različite vrste kompozita

(b) V_{50} versus Thickness

Slika 7.3 [12] Rezultati V50 testa s obzirom na debljinu kompozita za različite vrste kompozita

Kao što se vidi na prethodnim slikama postoje različite vrste vlakana koje se koriste za izradu protubalističke zaštite. S-2 staklo je 30 – 40 % jeftinije od ostalih navedenih vrsta vlakana, a ima svojstvo da za istu debljinu kao i aramidi ima bolja protubalistička svojstva od aramida. Zato razmotrimo upotrebu takvog materijala za protubalističku zaštitu nadgrađa.

Prema istraživanju iz [9] gdje se provodi testiranje, „*The S2-Glass/phenolic HJI composite armour*“, kompozitni oklop baziran na S-2 staklenom ojačanju sa fenolnom smolom. Prema tome istraživanju osim same kompozitne konstrukcije potreban je i tvrdi materijal iza nje kako bi zaustavio protuoklopni projektil. Vrste protubalističke zaštite (konstrukcija Panela) s obzirom na V50 test i veličinu projektila odnosno stupanj zaštite prema STANAG 4569, u odnosu na potrebnu gustoću S-2 kompozita, što se može vidjeti u tablici 6.2 [9]. Osim toga za više stupnjeve zaštite je potrebna i keramička ploča ispred kompozita kako bi zaustavila protuoklopni projektil.[9]

Tablica 7.2 [9] Rješenja S-2 protubalističku zaštitu prema STANAG 4569 stupnjevima prijetnje

Stupanj prijetnje	Vrsta streljiva	Konstrukcija panela	V50(m/s)	Potrebna površinska gustoća kompozita (kg/m ²)
5	25mmx137 APDS-T, PMB 073	88mm S-2/25mm keramička ploča	1258	276
4	14,5 mmx114 AP/B32	16,5mm S-2/15mm keramička ploča	911	90,5
3	7,62 mmx51 AP (WC core)	8mm S-2/keramička ploča	930	67,5
2	7,62 mmx39 API BZ	8mm S-2/8mm keramička ploča	695	46,6
1	7,62 mmx51 NATO ball	S-2	833	48,2
1	5,56mmx45 M193	S-2	937	38,4

Sada kada znamo površinsku gustoću možemo prema površini nadgrađa izračunati težinu nadgrađa za pojedini stupanj prijetnje. Ako je ukupna površina nadgrađa 226,3 m², izračunata masa nadgrađa za različite stupnjeve prijetnje prema STANAG 4569 je prikazana u tablici 6.3.

Tablica 7.1 Masa nadgrađa za pojedine stupnjeve zaštite

Stupanj prijetnje	Konstrukcija panela	Površinska gustoća kompozita (kg/m ²)	Masa nadgrađa (kg)
5	88mm S-2/25mm keramička ploča	276	62458,8
4	16,5mm S-2/15mm keramička ploča	90,5	20480,15
3	8mm S-2/keramička ploča	67,5	15275,25
2	8mm S-2/8mm keramička ploča	46,6	10545,58
1	S-2	48,2	10907,66
1	S-2	38,4	8689,92

Kao što se vidi prema tablici 7.1 masa raste sa stupnjem zaštite, što je bilo i za očekivati. Kada bi se išlo na balističku zaštitu nadgrađa trebalo bi se vratiti na sami početak projekta i analizirati utjecaj mase nadgrađa na otpor i stabilite, pošto su te razlike u masi nadgrađa i više nego vidljive.

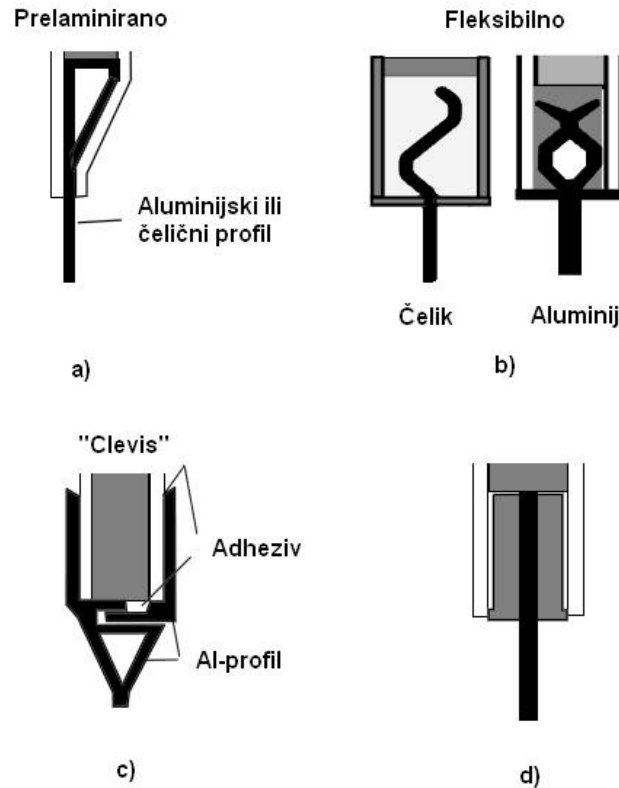
8. Spoj kompozitnog nadgrađa sa metalnim trupom

Kompozitne strukture se često koriste za gradnju manjih brzih brodova, ali i sve češće se ugrađuju u veće brodove gdje je potrebna ušteda u masi zbog zahtjeva u brzini. Spoj velikih sendvič konstrukcija na čelične ili aluminijske strukture je zahtjevan posao. Kada se radi o zakivanju, tada imamo povećanje cijene spoja sa većim brojem zakovica odnosno većom strukturom. S druge strane vrlo je teško, ponekad i nemoguće, napraviti kvalitetan adhezijski spoj u brodogradilištu i to zbog nečistoća koje se javljaju na spojnom mjestu, kontroliranja temperature i vlage. [14]

Opterećenja koja utječu na spoj vlaknima ojačane strukture nadgrađa i metalne strukture trupa, odnosno palube možemo podijeliti na tri vrste:

- Lokalna opterećenja – bočni tlak i sile koje djeluju uslijed hidrostatskog i hidrodinamičkog tlaka, pritisak vjetra, težina strukture ili ubrzanja
- Globalna opterećenja – deformacije i naprezanja u metalnoj strukturi uzrokovanih momentom savijanja na mirnoj vodi, valnim opterećenjima i udaranjem u valove
- Napetosti u materijalima koje nastaju pri visokim temperaturama, zavarivanje, ukoliko postoje velike razlike toplinskih koeficijenata za materijale

Prema istraživanju provedenom u [14] su ponuđena 4 rješenja adhezijskog spoja koja su primjenjiva u brodogradnji. Naravno podrazumijeva se da su sendvič strukture pripremljene u izoliranoj okolini.



Slika 8.1 [14] Različite vrste spojeva za sendvič strukture

Na slici 8.1 se mogu vidjeti različite vrste adhezijskog spoja kompozitne sendvič strukture i metalnog profila koji se ugrađuje na mjestu proizvodnje sendvič panela te se dopremi u brodogradilište i jednostavno zavari sa ostatkom metalne konstrukcije. Objasnimo malo ta četiri spoja.

- a) **Prelaminirani spoj (*Overlamineted*)** – metalni profil je spojen sa laminatom u samom procesu laminiranja. Šuplji profil zamjenjuje materijal jezgre na rubu panela. Geometrija profila je jednostavna, a može se izraditi od nehrđajućeg čelika ili aluminija. [14]
- b) **Fleksibilan spoj (*Flexible Joint Concept*)** – baziran je na vrlo fleksibilnom (poliuretan) adhezivnom punjenju šupljine na kraju panela koja je napravljena odstranjivanjem jezgre. Dvije su verzije takvog spoja, jedna za čelični profil druga za aluminijski profil. Kod čeličnog profila kao vezivo se koristi jednokomponentni

poliuretan, dok se kod aluminijskog profila kao dvokomponentno vezivo poliuretan-elastomer. [14]

- c) „**Clevis**“ – podesivi profil u ovom spoju čini moguće korištenje istog profila za panele različitih debljina. Zbog kompliciranog oblika profila moguće je korištenje samo ekstrudiranog aluminija.
- d) **Adhezivni spoj sa jezgrom visoke gustoće vezane na profil** – spoje je pogodan za čelične ravne profile, ali zbog puno stadija proizvodnje spoju raste cijena

Vezivo koje se koristi u konceptu Fleksibilnog spoja sa čeličnim profilom jest jednokomponentno poliuretansko vezivo sa razvlačenjem do loma od 300%. Analiza takvog fleksibilnog materijala zahtjeva specifična načine rješenja kao što se koriste kod analiza gumenih struktura. Analiza ovakvog spoja je pokazala da spoj ima zadovoljavajuću čvrstoću uspoređujući ga sa drugim spojevima. Jedna od prednosti ovakvog spoja je mogućnost prigušenja vibracija.

9. Usporedba dobivenih rezultata sa projektom patrolnog broda Bakar

Dobivene rezultate (mase) izračunatih konstrukcija od stakloplastike i sendvič panela uspoređenih sa dobivenom masom od strane tvrtke Adria-Mar brodogradnja d.o.o. za masu nadgrađa od aluminijskih legura možemo vidjeti u sljedećoj tablici.

Tablica 9.1 Masa nadgrađa za pojedine stupnjeve zaštite

Materijal gradnje	Masa nadgrađa (t)	Povećanj/smanjenje u odnosu na AL-nadgrađe (%)
Stakloplastika	4,5	-4,2
Sendvič paneli	3,8	-20
Aluminijske legure	4,7	-
Protubalistička zaštita (1)	8,7	+85
Protubalistička zaštita (1 viši stupani)	10,9	+132

Kao što se može vidjeti što se tiče konstrukcije nadgrađa od stakloplastike u usporedbi sa aluminijskim nadgrađem nema znatne uštede, svega 4%, što je još manje ako znamo da masa nadgrađa od aluminija sudjeluje u ukupnoj masi patrolnog broda Bakar svega 4%, odnosno ima masu 50% zaliha (masa zaliha 10 t). Dakle ova ušteda na masi nema nikakav utjecaj brzinu broda. Cijena gradnje aluminijem je 15 € po kilogramu, dok cijena gradnje od stakloplastike varira od 5 do 24 € po kilogramu, ovisno o vrsti tkanine, smole i postupcima izrade. Prednosti gradnje od stakloplastike moramo tražiti u prednostima stakloplastike u odnosu na aluminijske legure koji su navedeni u uvodnim razmatranjima o kompozitnim materijalima, stoga navedimo najznačajnija:

- Bolja svojstva protiv zamora materijala
- Lakše i jednostavnije je održavanje i popravci

Što se tiče konstrukcije nadgrađa od sendvič panela ono je u odnosu na aluminijsko, a s time i na staklopalstično, pridonijelo znatne uštede, ako se gleda isključivo na nadgrađe, od čak 20 %. Međutim kao što je već navedeno to je neznatna masa u odnosu na ukupnu masu broda od 123 t, odnosno ta ušteda u odnosu na masu punog broda je 2,5% što daje promjenu što također nema nikakav utjecaj otpor, odnosno brzinu. Prednosti dakako možemo tražiti u prednostima sendvič konstrukcije nad aluminijem.

10. Zaključak

U diplomskom zadatku je analizirana primjena kompozitnog nadgrađa na metalnom trupu patrolnog broda. Što se tiče projekta Bakar male ili skoro nikakve uštede na masi, u odnosu na cijeli brod, nisu primijećene. Međutim kako napreduje tehnologija izrade kompozitnih materijala tako se iz dana u dan njihova cijena gradnje smanjuje te se tu treba tražiti najviše prednosti takve primjene. Izuzev toga prednosti koje su navedene, kao što su bolja svojstva na zamor materijala i jednostavnije održavanje, daju prednost kompozitnim materijalima u odnosu na, u ovom slučaju aluminijske legure.

Što se tiče balističke zaštite, može se zaključiti da dolazi do rasta mase sa stupnjem zaštite, što je bilo i za očekivati. Da bi se tako nešto moglo primijeniti potrebno je napraviti analize zahtjeva na samom početku projekta i vidjeti koji su stupnjevi zaštite potrebni i na koji način (vrsta materijala) će se ta zaštita primijeniti kako bi se, zbog porasta mase, mogle napraviti izmjene na formi broda.

Predložen je spoj sendvič kompozita sa metalnim trupom, fleksibilan spoj koji prigušuje vibracije. Nije poznato koliko ih prigušuje jer za to bi trebalo ulaziti u dublje analize spaja i naravno vibracija koje se javljaju na mjestu spoja.

12. Literatura

- [1] Ivica Smojver : Mehanika kompozitnih materijala, FSB, Zagreb, 2007.
- [2] Filetin, Kovačiček, Indof: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2002.
- [3] SP System guide to composites
- [4] Walter Kunej: Poliesterski kompoziti, Metalmineral d.d., Zagreb, 2006
- [5] Eric Green Associates: Marine Composites Second Edition, www.marinecomposites.com
- [6] Mladen Šercer: Predavanja-prerada kompozitnih tvorevina, FSB, Zagreb, 2008/2009
- [7] J. Indof, Đ. Španiček: Primjena sendvič konstrukcija na osnovi polimernih materijala, FSB, Zagreb
- [8] NATO-Military agency for standardization: STANAG 4569, 2004.
- [9] Fecko, Lyle, Gambert: Composite armour solutions for STANAG 4569 ballistic protection levels, 2006.
- [10] www.wikipedia.org
- [11] www.booletprofme.com
- [12] www.anmatiac.alionscience.com
- [13] Indof, Španiček: Primjena sendvič konstrukcije u brodogradnji, XVI Simpozijum Sorta, 2004.
- [14] M. Hentinen, M. Hildebrand, M. Visuri: Adhesively bonded joints between FRP sandwich and metal, Diferent concepts and their strenght behaviour, VTT, Finland, 2007.